

Linee guida per la redazione e l'uso delle carte della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento

*Original*

Linee guida per la redazione e l'uso delle carte della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento / DE MAIO, Marina; Civita, Massimo; Farina, Marco; Adriano, Zavatti. - ELETTRONICO. - (2001).

*Availability:*

This version is available at: 11583/2592718 since:

*Publisher:*

Anpa

*Published*

DOI:

*Terms of use:*

openAccess

This article is made available under terms and conditions as specified in the corresponding bibliographic description in the repository

*Publisher copyright*

(Article begins on next page)



**ANPA**

Agenzia Nazionale per la  
Protezione dell'Ambiente

# **Linee-guida per la redazione e l'uso delle carte della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento**

---

### **Informazioni legali**

L'Agenzia Nazionale per la Protezione dell'Ambiente o le persone che agiscono per conto dell'Agenzia stessa non sono responsabili per l'uso che può essere fatto delle informazioni contenute in questo rapporto.

### **Agenzia Nazionale per la Protezione dell'Ambiente**

Via Vitaliano Brancati, 48 - 00144 Roma  
*Dipartimento Rischio Tecnologico e Naturale*  
*Unità Interdipartimentale Rischio Idrogeologico*  
[www.anpa.it](http://www.anpa.it)

© ANPA, Manuali e linee guida 4/2001

ISBN 88-448-0241-4

Riproduzione autorizzata citando la fonte

### **Coordinamento ed elaborazione grafica**

ANPA, Immagine  
Grafica di copertina: Franco Iozzoli  
Foto di copertina: Paolo Orlandi

### **Coordinamento tipografico**

ANPA, Dipartimento Strategie Integrate Promozione e Comunicazione

### **Impaginazione e stampa**

I.G.E.R. srl - Viale C.T. Odescalchi, 67/A - 00147 Roma

Stampato su carta TCF

Finito di stampare nel mese di dicembre 2001

**Autori**

Marina De Maio, *Politecnico di Torino*

Massimo Civita, *Politecnico di Torino*

Marco Farina, *Arpa Emilia-Romagna*

Adriano Zavatti, *Arpa Emilia-Romagna*



# Indice

<b>PRESENTAZIONE</b>	<b>I</b>
<b>I. INTRODUZIONE</b>	<b>3</b>
<b>2. PRINCIPI E METODI</b>	<b>5</b>
2.1 Richiami sulle principali metodologie di valutazione della vulnerabilità intrinseca	5
2.2 Scelta dei metodi più adatti al territorio italiano	8
2.3 Cartografia integrata della vulnerabilità	11
2.4 Acquisizione delle informazioni	12
<b>3. LE METODOLOGIE</b>	<b>15</b>
3.1 Il metodo sintacs - I principi teorici	15
3.1.1 Soggiacenza	15
3.1.2 Infiltrazione	18
3.1.3 Effetto di autodepurazione del non saturo	20
3.1.4 Tipologia della copertura	23
3.1.5 Caratteristiche ideologiche dell'acquifero	25
3.1.6 Conducibilità idraulica dell'acquifero	26
3.1.7 Acclività della superficie topografica	27
3.1.8 Descrizione delle linee di pesi	28
3.1.9 L'indice di vulnerabilità	32
3.2 Metodo base GNDCI	35
3.2.1 Parametri di ingresso	35
3.2.2 Elaborazione	36
3.2.3 Prodotto finale e presentazione	36
3.2.4 Analisi critica del metodo	37
3.3 Metodologia d'approccio combinato	41
3.3.1 L'approccio combinato	41
3.4 Il censimento delle attività impattanti e dei soggetti a rischio	42
<b>4. ELABORAZIONI DELLE INFORMAZIONI CON METODI GIS</b>	<b>49</b>
4.1 Il modello dei dati	49
4.1.1 I sistemi di rappresentazione cartografica	49
4.1.2 I sistemi di riferimento	50
4.1.3 I dati vettoriali	50
4.1.4 I dati raster	51
4.1.5 La modellazione tridimensionale	52
4.1.6 Gli attributi	52
4.2 Parametri e standard dei dati gis	53
4.2.1 I tipi di dati	53
4.2.2 L'accuratezza	53
4.2.3 La risoluzione	53
4.2.4 L'associazione di attributi	54
4.2.5 Gli algoritmi di elaborazione	55
4.3 Funzioni ed operatori gis	55

4.3.1	L'overlay topologico	56
4.3.2	Il buffering	56
4.3.3	L'analisi di rete	57
4.3.4	Gli operatori raster e tridimensionali	57
4.3.5	L'interfaccia utente e la programmabilità	58
4.4	Scelta del software	58
4.5	Metodi di vulnerabilità e GIS	60
4.5.1	Metodo naturale	60
4.5.2	Metodo sintacs	61
4.6	Raccolta, catalogazione e calcolo dei parametri di input	61
4.7	Automatizzazione del calcolo e della rappresentazione grafica	63
4.7.1	Il Main Program: procedura sintacs	63
4.7.2	La procedura calcola	64
4.7.3	La procedura esecuzione	64
4.7.4	La procedura colora	64
4.7.5	Trasferimento dati su sistemi gis	65
<b>5.</b>	<b>USO DELLE CARTE DI VULNERABILITÀ</b>	<b>67</b>
5.1	Obiettivi della cartografia di vulnerabilità	67
5.2	Evoluzione del quadro normativo italiano	69
5.2.1	Principali modifiche del quadro normativo vigente	69
5.2.2	Urgenza di strumenti di tutela	70
5.3	Il fattore scala nella cartografia di vulnerabilità	71
5.3.1	Analisi a grande scala	71
5.3.2	Analisi a media scala	72
5.3.3	Analisi a piccola scala	72
5.4	Conclusioni	73
<b>6.</b>	<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>77</b>
<b>APPENDICE A:</b>	<b>GLOSSARIO</b>	<b>91</b>
<b>APPENDICE B:</b>	<b>LISTA DELLE ABBREVIAZIONI E DEGLI ACRONIMI USATI NEL TESTO E NELLA BIBLIOGRAFIA</b>	<b>95</b>
<b>APPENDICE C:</b>	<b>DATA BASE</b>	<b>99</b>

## Presentazione

Le acque sotterranee costituiscono circa l'85% delle risorse destinate al consumo umano in Italia, e la protezione di queste riserve strategiche al fine di prevenire il loro degrado quantitativo e qualitativo è uno degli obiettivi prioritari delle politiche di settore.

Tale priorità si riflette nel significativo lavoro sviluppato in campo normativo, dal DPR 236/88 sino al recente D.Lgs. 152/99. In particolare questa innovativa norma sulla tutela delle acque (sotterranee), anche in funzione dei consistenti carichi al suolo di fertilizzanti, nutrienti e pesticidi che caratterizzano il territorio nazionale, prevede che i piani di monitoraggio e le misure di controllo sullo stato degli acquiferi siano precedute da ampi e approfonditi studi di caratterizzazione territoriale da integrare nei piani di bacino.

Tra questi studi una giusta rilevanza è attribuita allo sviluppo della cartografia della vulnerabilità secondo i criteri e gli indirizzi previsti dall'allegato 7 della stessa norma, che conferisce all'ANPA il compito di sviluppare adeguate iniziative per sostenere i soggetti competenti per territorio (regioni, province autonome e agenzie ambientali) nell'attività di identificazione delle aree vulnerabili del loro territorio e quindi acquisire e utilizzare questi essenziali strumenti di conoscenza.

A tal fine, già nel 1999 furono definite le modalità di attuazione di uno studio che ANPA ha affidato all'ARPA Emilia Romagna in collaborazione con il Dipartimento di Georisorse e Territorio del Politecnico di Torino, sede dell'U.O. 4.1. del GNDCI-CNR per fare il punto sulla copertura del territorio italiano con cartografie della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento.

Lo studio ha due finalità principali: una di carattere conoscitivo-operativo, l'altra di natura metodologica.

E' stata infatti programmata la preparazione di un database interrogabile, interfacciato GIS, contenente tutte le notizie relative alle cartografie suddette, delle quali, dunque, si doveva operare preventivamente il censimento. Per la rappresentazione della copertura sono stati definiti opportuni simboli e colori, anche in sovrapposizione ad una base geografica del territorio italiano in scala 1:1.200.000.

Per gli aspetti metodologici lo studio ha dato priorità alla stesura delle *linee-guida* per la redazione delle Carte di Vulnerabilità in qualsiasi situazione idrologica e morfologica del territorio italiano, con metodi tradizionali e mediante l'uso intensivo delle metodologie GIS.

Questo documento presenta gli esiti dell'attività di studio e in particolare di predisposizione delle suddette *linee-guida*, come discendono da circa 3 lustri di esperienza nazionale ed internazionale della Linea 4 del GNDCI-CNR, appositamente costituita nel 1985 per studiare tali problematiche.

Le linee guida sulla cartografia della vulnerabilità, sono un primo contributo dell'ANPA per proporre criteri armonizzati per tutti gli utilizzatori istituzionali in questo specifico settore della tutela ambientale.

Riteniamo opportuno sottolineare che, come peraltro prassi dell'ANPA nell'emanazione di documenti metodologici, le linee-guida presentate in questo testo non devono essere intese come un punto d'arrivo, uno strumento consolidato e stabile, ma solo come l'avvio di un processo di armonizzazione di metodi per cartografare la vulnerabilità degli acquiferi.



In tal senso viene rivolto un caloroso invito a quanti vorranno utilizzare questo strumento perché con i loro suggerimenti possano contribuire al suo continuo miglioramento, facendolo quindi diventare un prodotto di tutti.

Oltre agli elementi metodologici necessari alla determinazione delle aree vulnerabili, si propongono anche, in un apposito database interfacciato GIS, tutte le informazioni relative alle cartografie di vulnerabilità realizzate in Italia, la cui copertura territoriale è cartografata a scala 1:1.200.000.

Questo è un ulteriore contributo di natura operativo-conoscitiva, realizzato nell'ambito del programma di sviluppo del Sistema informativo nazionale per l'ambiente (SINANet), con l'obiettivo di rendere a tutti disponibili una migliore e più consapevole conoscenza dell'ambiente nel nostro Paese.

Roberto Caracciolo  
Direttore Dipartimento Stato dell'Ambiente,  
Controlli e Sistemi Informativi

## I. Introduzione

Il documento descrive le modalità per la redazione e l'uso delle carte di vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento, secondo i criteri e gli indirizzi previsti dall'allegato 7 al decreto legislativo 152/99, relativo alla tutela delle risorse idriche.

I contenuti sono stati articolati in cinque capitoli, oltre alla presente introduzione, una bibliografia e due appendici.

Nel secondo capitolo viene presentata una breve rassegna delle metodologie per la valutazione della vulnerabilità intrinseca e per la selezione degli approcci più appropriati per il territorio nazionale.

Nel terzo capitolo sono presentati e commentati i metodi SINTACS, base GNDCl e combinato per la definizione e la rappresentazione della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento.

Il quarto capitolo è dedicato alla trattazione dei criteri per la elaborazione delle informazioni con metodi GIS: modello dei dati, parametri e standard dei dati, funzioni ed operatori, scelta del software. L'applicazione di tali metodi e la redazione delle carte di vulnerabilità intrinseca e integrata rappresentano gli esempi applicativi d'illustrazione dei criteri proposti.

Infine, nel quinto capitolo è trattato l'uso delle carte di vulnerabilità, e viene posto l'accento sull'importanza di questi strumenti per la conoscenza del territorio.

Una ricca bibliografia (Cap. 6), contenente oltre cento titoli, complementa i contenuti del volume, che comprende anche un glossario dei termini utilizzati e una lista degli acronimi nelle appendici A e B, rispettivamente.

Allegato al documento in un CD è organizzato un database, interfacciato GIS, con tutte le informazioni relative alle cartografie di vulnerabilità realizzate in Italia, la cui copertura territoriale è cartografata a scala 1:1.200.000. La struttura del DB ed il suo utilizzo sono descritti nell'Appendice C.



## 2. Principi e metodi

### 2.1. Richiami sulle principali metodologie di valutazione della vulnerabilità intrinseca

La *vulnerabilità intrinseca o naturale* degli acquiferi si definisce come la suscettibilità specifica dei sistemi acquiferi, nelle loro diverse parti componenti e nelle diverse situazioni geometriche ed idrodinamiche, ad ingerire e diffondere, anche mitigandone gli effetti, un inquinante fluido od idroveicolato tale da produrre impatto sulla qualità dell'acqua sotterranea, nello spazio e nel tempo (Civita, 1987).

La vulnerabilità intrinseca dipende, sostanzialmente, da almeno tre principali processi che si producono all'interno del sistema - sottosuolo esistente al di sotto del punto o/e della zona d'impatto:

- lo *spostamento dell'acqua* (o di un *inquinante fluido o idroportato*) attraverso l'insaturo, sino a raggiungere la superficie piezometrica dell'acquifero sottostante;
- la *dinamica del flusso* sotterraneo e di un *inquinante fluido o idroportato* nella zona di saturazione dell'acquifero sottostante;
- la *concentrazione residua di un inquinante fluido o idroportato* al suo arrivo nella zona di saturazione rispetto a quella iniziale, che marca la capacità di attenuazione dell'impatto dell'inquinante del sistema acquifero.

I tre processi principali s'identificano con le diverse possibili sinergie di tutta una serie di parametri propri della situazione idrogeologica e antropica e quindi variabili da zona a zona (Tabella 2.1). Il processo d'attenuazione che si sviluppa all'interno del sistema acquifero, nel momento e nel

**Tabella 2.1 - Fattori principali e parametri di base che reggono la vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento (Da: Civita M., 1994)**

Processi principali	Parametri di base
<b>TEMPO DI TRANSITO</b>	Soggiacenza (spessore insaturo). Spessore, tessitura, porosità; Permeabilità, ritenzione specifica del suolo; Litologia, granulometria, indice di fratturazione, indice di carsificazione, struttura e permeabilità verticale dell'insaturo; Densità, viscosità, solubilità in acqua degli inquinanti; Ricarica attiva media globale.
<b>DEFLUSSO SOTTERRANEO</b>	Caratteristiche idrolitologiche dell'acquifero (porosità utile, permeabilità, dispersione, immagazzinamento, velocità effettiva di flusso, ...); Struttura, geometria, gradiente idraulico.
<b>CAPACITÀ D'ATTENUAZIONE DELL'IMPATTO DEGLI INQUINANTI</b>	Temperatura dell'acqua e delle rocce acquifere; Densità, viscosità e solubilità in acqua degli inquinanti; Soggiacenza; Ricarica attiva media globale; Acclività e uso della superficie topografica; Densità del reticolo drenante e rapporti con l'acquifero; Spessore, tessitura, composizione mineralogica, contenuto in sostanza organica, ritenzione specifica, caratteri chimico-fisici e permeabilità del suolo e dell'insaturo in generale.

punto in cui esso riceve una certa quantità di un inquinante fluido o veicolato dalle stesse acque d'infiltrazione o di travaso, dipende dalla tipologia e dalla concentrazione d'origine dell'inquinante ma anche dalla reattività del sistema. Questa è direttamente proporzionale al tempo che il fluido impiega a giungere sino alla zona satura (tempo di transito =  $\tau_{OT}$ ) e, dunque, alla lunghezza del percorso; e inversamente proporzionale alla velocità di filtrazione ed alla dispersione cinematica, che sono tipiche del mezzo. Durante il percorso nell'insaturo, infatti, e a seconda delle caratteristiche di questo, avvengono molte interazioni tra suolo, rocce componenti il sottosuolo, acque sotterranee ed inquinanti, le quali concorrono a mitigare, spesso in modo notevole, l'impatto di questi ultimi. Un'ulteriore azione di attenuazione, certo non secondaria, avviene nel momento in cui la concentrazione residua di inquinante giunge a diluirsi nella zona di saturazione in ragione della velocità, del valore della portata unitaria di flusso e della dispersione che opera il mezzo.

Appare, dunque, evidente che la valutazione della vulnerabilità di un acquifero dovrebbe essere effettuata caso per caso, tenendo conto delle caratteristiche fisiche e chimiche di ogni singolo inquinante presente (o di famiglie di prodotti assimilabili), del tipo di fonte (puntuale, diffusa), dei quantitativi, dei modi e dei tempi di sversamento. Sebbene scientificamente ineccepibile e realizzabile su piccole zone delle quali si vuole valutare il potenziale di inquinamento di un centro di pericolo (i.e. *Site Analysis*) un tale intento non ha alcuna praticità quando la valutazione delle vulnerabilità viene effettuata per grandi aree, in un'ottica di piano, con lo scopo di *prevenire* l'inquinamento e *proteggere* gli acquiferi e le fonti di approvvigionamento d'acqua destinata al consumo umano.

Negli ultimi 20 anni sono stati messi a punto ed utilizzati molteplici sistemi d'elaborazione generalizzata dei dati di base normalmente disponibili. Questi sistemi sono molto diversi, a seconda della fisiografia delle zone per i quali sono stati studiati, del numero e della qualità dei dati disponibili, a seconda delle finalità degli studi nel cui quadro sono stati sperimentati. Pertanto, è interessante suddividerli in due categorie abbastanza distinte, a seconda che le metodologie siano applicabili in qualsivoglia scenario fisiografico e geografico oppure abbiano validità limitata ad aree particolari. Per semplicità, si propongono i termini *universale* e *locale* per distinguere le due categorie.

Da un punto di vista essenzialmente tipologico, è necessario suddividere tali metodologie in tre gruppi fondamentali:

- Zonazione per aree omogenee (valutazione per *complessi e situazioni idrogeologiche* [CSI]);
- Valutazione per *sistemi parametrici*:
  - Sistemi a matrice* (Matrix Systems [MS]);
  - Sistemi a punteggio semplice* (Rating Systems [RS]);
  - Sistemi a punteggi e pesi* (Point Count System Models [PCSM]);
- Valutazione per *modelli numerici* (Espressioni Analogiche [AR]).

I principali metodi utilizzati in campo internazionale ed i parametri che l'informano sono sinteticamente riportati in Tabella 2.2.

I metodi di *zonazione per aree omogenee* valutano la vulnerabilità per *complessi e situazioni idrogeologiche* (CSI), usando la tecnica di sovrapposizione cartografica, inizialmente per *overlay* fisico (per es. sovrapposizione di tematismi diversi in forma cartacea), oggi giorno per *overlay* informatico di supporti georeferenziati, via GIS. Si tratta, in genere di sistemi di valutazione del tipo universale, adatti ad essere usati su territori vasti ed articolati dal punto di vista idrogeologico, idrostrutturale e morfologico. Sono, dunque, particolarmente adatti per generare cartografie tematiche a denominatore di scala medio - grande e ad essere utilizzati per la copertura di interi territori nazionali.

METODOLOGIA	DATI DI BASE														
	TIPO	Precipitazioni: tasso e chimismo	Acclività superficie topografica	Densità reticolo drenante superficiale	CARATTERISTICH E DEI SUOLI				Collegamento acquifero- reticolo drenante	Infiltrazione efficace	Caratteri idrogeologici dell' insaturo	Soggiacenza	Escursione piezometrica	Caratteri idrogeologici del saturato	Conducibilità idraulica acquifero
					Mineralogia e tessitura	Ritenzione specifica	Permeabilità	Caratteri chimico-fisici							
Albinet e Margat (1970) BRGM (1970 )	CSI								●		●	●		●	●
Vrana (1968) Olmer, Rezac (1974)	CSI										●			●	
Fenge (1976)	RS				●										
Josopait, Swerdtfeger (1976)	CSI									●	●	●		●	●
Zampetti (1983) Fried (1987)	AR										●	●			
Villumsen et Al. (1983)	RS				●										
Haertle' (1983)	MS										●	●			
Vrana (1984)	CSI	●			●						●			●	
Subirana A., Casas P. (1984)	CSI								●		●	●		●	●
Engelen (1985)	MS								●		●	●		●	
Zaporozec (Edit. ) (1985)	RS				●	●	●	●			●	●		●	
Breeuwsma <i>et Al.</i> (1986)	CSI														
Sotornikova, Vrba (1987)	RS						●					●	●		●
Ostry <i>et Al.</i> (1987)	CSI				●			●				●		●	
Minist. Flamish Comm. (1986) Goossens, Van Damme (1987)	MS								●		●	●		●	●
Carter <i>et Al.</i> (1987) Palmer (1988)	MS				●		●	●						●	
Marcolongo, Pretto (1987) Metodo 1	RS				●					●	●	●			
Marcolongo, Pretto(1987) Metodo 2	AR					●				●	●	●			
GOD Foster (1987, 1988)	RS										●	●		●	
Schmidt (1987)	RS				●				●		●	●			
Metodo-base GNDICI - CNR Civita (AA.VV. 1988, 1990)	CSI								●		●	●		●	●
DRASTIC Aller <i>et Al.</i> (1985, 1987)	PCSM		●		●					●	●	●		●	●
SINTACS R2 Civita (1990,1991,1994,1996 )	PCSM	●	●	●	●				●	●	●	●		●	●
SINTACS R4 Civita e De Maio (1997)	PCSM	●	●	●	●		●		●	●	●	●		●	●
SINTACS R5 Civita e De Maio (2000)	PCSM	●	●	●	●		●	●	●	●	●	●	●	●	●

Tabella 2.2 - Principali metodologie e relativi dati di base utilizzati per la valutazione e la cartografia della vulnerabilità intrinseca degli acquiferi (Da: Civita [1994] - Aggiornata)



I parametri presi in considerazione sono quasi sempre gli stessi: caratteristiche idrolitologiche del saturo e dell'insaturo, soggiacenza, permeabilità relativa, velocità di percolazione degli acquiferi. A questi vengono aggiunti, a seconda degli AA., della fisiografia delle aree d'interesse e delle finalità del lavoro, altri dati (caratteristiche fisiche e chimiche dei suoli, collegamento con i corpi idrici superficiali, ricarica attiva) molto meno agevoli da ottenere e non sempre ricavabili in base alle informazioni normalmente disponibili in molte realtà nazionali. La valutazione della vulnerabilità è fornita in termini qualitativi, per intervalli opportunamente descritti o preordinati per situazioni - tipo (Civita, 1990).

Il principio che informa i diversi tipi di *sistemi parametrici* è simile: vengono, innanzi tutto, selezionati i parametri sui quali si ritiene di basare la valutazione della vulnerabilità; a ciascun parametro, suddiviso per intervalli di valori o/e per tipologie dichiarate, viene attribuito un punteggio arbitrario crescente in funzione dell'importanza che esso assume nella valutazione complessiva.

I *sistemi a matrice (MS)* hanno un utilizzo quasi sempre locale e si basano su pochi parametri opportunamente mirati.

I *sistemi a punteggio semplice (RS)* traggono più o meno tutti spunto dal sistema Legrand (1964, 1983). A ciascuno dei parametri prescelti come necessari e sufficienti per la valutazione della vulnerabilità intrinseca è attribuito un intervallo di punteggio, quasi sempre fisso. Questo è opportunamente suddiviso in funzione dell'intervallo di variazione del singolo parametro. Viene, quindi, ottenuta la valutazione desiderata per ciascun punto o area presa in considerazione dalla sommatoria dei punteggi. La gamma completa dei punteggi (tra minimo e massimo) è, sovente, suddivisa in segmenti, a ciascuno dei quali è attribuito un grado di vulnerabilità espresso in termini palesi. I dati di base che sono utilizzati in questi sistemi sono parecchi: alcuni AA. danno un'importanza prevalente alle caratteristiche fisiche e chimiche dei suoli (Tabella 2.2), mentre altri focalizzano il metodo sui dati idrogeologici e idrologici principali.

Un'ulteriore evoluzione nei sistemi di valutazione parametrica si è registrata con l'avvento delle metodologie basate sul punteggio e sul peso (**PCSM**). Rispetto ai RS, i PCSM introducono una o più linee di pesi (*weights*), cioè un moltiplicatore a gamma fissa per ciascun parametro di base considerato, che amplifica il punteggio attribuito al parametro stesso in misura preordinata. Ciò, allo scopo di evidenziare l'importanza di uno o più parametri nel definire la vulnerabilità in particolari situazioni idrogeologiche o/e d'impatto antropico.

Le espressioni analogiche (AR) sono metodologie di valutazione di un indice di vulnerabilità ( $I_V$ ) intrinseca basate su espressioni analogico - matematiche semplici o complesse. Si tratta, dunque, di costruire ed applicare modelli matematici che richiedono una gran varietà di dati specialistici ottenibili per aree di piccole o piccolissime dimensioni. Il più delle volte, tali modelli non sono esportabili in realtà territoriali diverse da quelle nelle quali sono stati concepiti e, per altro, risultano inutili per la cartografia tematica.

Per un'illustrazione approfondita per gruppi di metodologie, per i riferimenti ad esempi d'applicazione al livello internazionale e per una discussione comparativa dei principali metodi, si rimanda a Civita (1994).

## 2.2. Scelta dei metodi più adatti al territorio italiano

La scelta dei metodi di valutazione della vulnerabilità degli acquiferi dipende, innanzi tutto, dalla disponibilità e dalla numerosità dei dati di base. In diversi Paesi, esistono organizzazioni, Enti ed Agenzie preposte specificatamente alla raccolta ed alla pubblicazione, ragionata ed ordinata, dei dati idrologici, idrogeologici, pedologici, ecc., necessari allo scopo. Attualmente, in Italia questa disponibilità non esiste altro che per limitate entità territoriali. Ciò non significa, però, che i dati suddetti non esistano affatto, ma solo che spesso

sono dispersi in tanti *cassetti* diversi ove è necessario andare a cercarli, per poi ordinarli e valutarne l'attendibilità, prima di utilizzarli.

Com'è stato ampiamente verificato confrontando approcci diversi applicati alla stessa area – campione (Civita, 1994), la scelta del metodo che meglio si adatta a realizzare una Carta della vulnerabilità per un determinato territorio deve cominciare con una valutazione, il più possibile realistica, del numero, della distribuzione e della qualità dei dati di base disponibili o/e rilevabili. Solo in base a tale valutazione si può stabilire il tipo di metodologia da adottare per l'elaborazione dei dati e, quindi, la scala della Carta e la legenda da adottare. A valle di quanto sopra esposto, è necessario ricordare che la cartografia della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento è un documento di piano. Essa deve entrare a far parte integrante dei Piani Regolatori di territori amministrativi d'ogni ordine e grado e, pertanto, non può dipendere dalla morfologia ma coprire aree spesso miste (pianura, collina, montagna).

Mentre le condizioni morfo - altimetriche più diffuse in gran parte d'Italia sono quelle miste, le metodologie messe a punto per la valutazione e la redazione di Carte della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento sono sovente vincolate al tipo, alla quantità oltretutto alla qualità dei dati di base necessari e disponibili. Pertanto, si è compreso che non è quasi mai possibile effettuare un'elaborazione della Carta di vulnerabilità con un metodo uniforme. Infatti, l'uniformità metodologica porta sovente ad una perdita di qualità dell'elaborato, dovendosi scegliere il metodo in funzione della parte dell'area d'interesse ove minore è la densità e la qualità dei dati.

Sulla base della recente esperienza italiana, è possibile esprimere la correlazione esistente tra i tre fattori fondamentali per la rappresentazione cartografica della vulnerabilità, cioè la *densità dei punti di rilevamento*, il *numero di informazioni* ottenibili per ciascun punto, e il *denominatore di scala* alla quale è possibile realizzare la carta. Dal diagramma in fig. 2.1 si evince che:

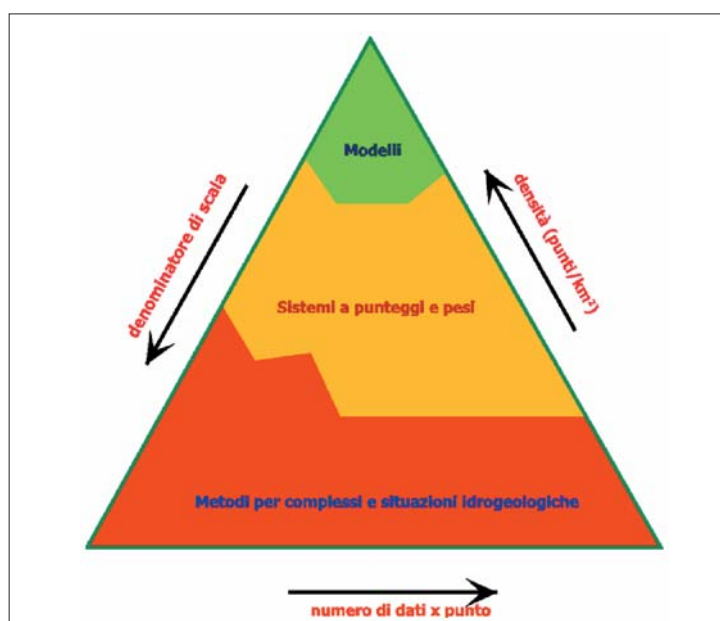
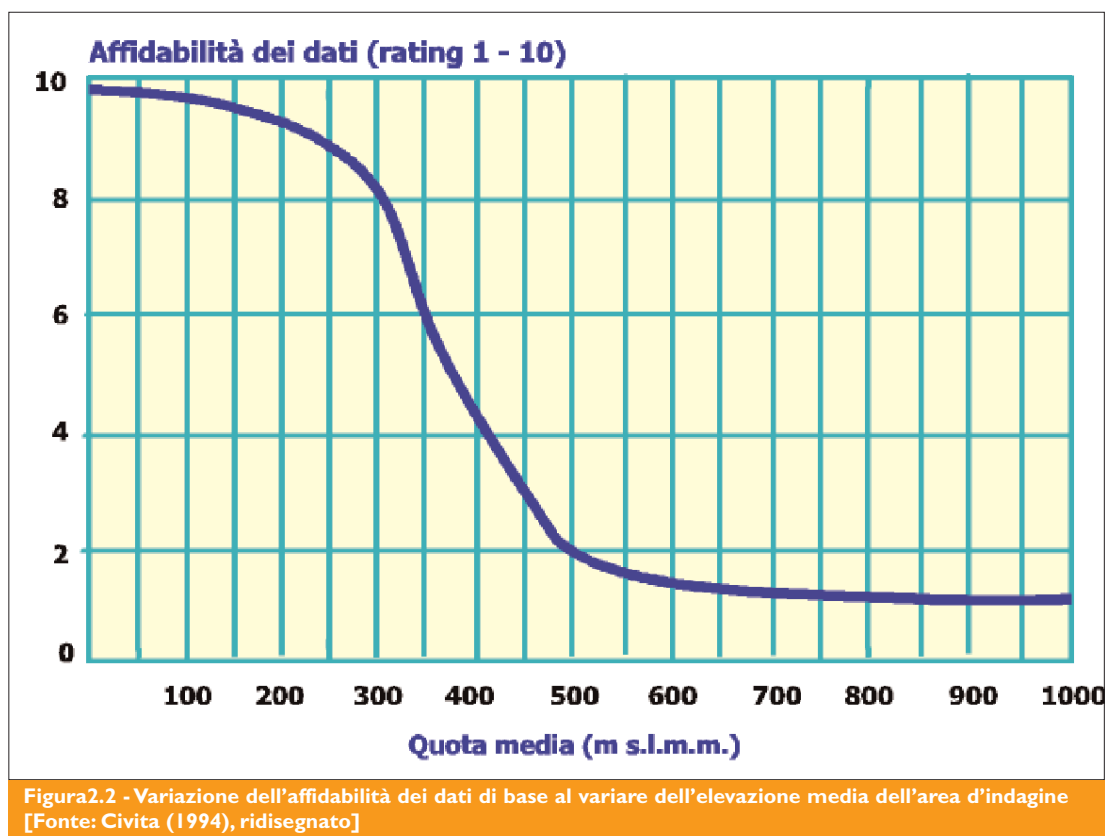


Figura 2.1 – Interrelazioni tra denominatore di scala, la densità dei punti di rilevamento ed il numero dei parametri/dati rilevati/disponibili per ciascun punto [Fonte: Civita (1994), ridisegnato]

- solo in presenza di un notevole numero di *punti di rilevamento per unità di superficie* (in ciascuno dei quali è possibile ricavare molteplici dati di base) è possibile utilizzare modelli complessi a basso denominatore di scala;
- per densità medie con buona distribuzione areale è, in linea di massima, possibile usare un metodo parametrico, più o meno complesso in funzione del *numero di informazioni* ricavabile per ciascun punto;





– quando le informazioni specifiche di base sono *generiche o/e scarse* e molto *disperse* sul territorio, come, per altro accade il più delle volte, è necessario utilizzare metodologie di elaborazione del tipo CSI adatte a denominatori di scala medio - grandi.

Nella scelta del metodo di valutazione della vulnerabilità pesa, inoltre, in maniera sostanziale, l'affidabilità dei dati di base. La mancanza di una seria valutazione, magari autocritica, dell'affidabilità dei dati disponibili, porta sovente alla ricerca di una precisione che, non solo è falsa ed effimera, ma comporta il più delle volte un vero e proprio stravolgimento dei risultati e, dunque, della loro utilità pratica. L'affidabilità dei dati varia, inoltre, notevolmente con la quota media dell'area d'indagine. Se proviamo ad assegnare un punteggio da 1 a 10 all'affidabilità dei dati, è possibile tracciare una curva che rappresenti la variazione di questa in funzione della quota media. Come mostra la fig. 2.2, al di sopra di quote relativamente basse (300-400 m s.m.) si ha una netta flessione di affidabilità, dovuta alla rarefazione dei dati ed alla crescente necessità di usare estrapolazioni ed interpolazioni spesso arbitrarie e quasi mai controllabili per infittirli. Ciò vale per i dati idrolitologici e idrostrutturali (composizione dell'insaturo, quote piezometriche, direzioni del flusso, conducibilità idraulica, geometria degli acquiferi, condizioni ai limiti), ma anche per i dati pedologici e climatologici (precipitazioni, evapotraspirazione, venti).

Queste affermazioni generiche devono essere tenute in conto all'atto della scelta dei metodi di valutazione della vulnerabilità: in pratica, nelle aree montuose e nella maggioranza di quelle collinari, sarà giocoforza utilizzare metodi di valutazione non troppo raffinati (**CSI**, **MS**) e restituzioni cartografiche a denominatore di scala medio - alto, preferendoli ai più sofisticati sistemi parametrici, la cui validità cresce nelle aree ove la densità e l'affidabilità dei dati è elevata e dove è possibile, anzi necessario, produrre cartografie a medio - basso denominatore di scala.

Da ciò deriva la necessità di fondere opportunamente due diverse metodologie, studiate e collaudate per l'applicazione a qualsivoglia parte del territorio italiano<sup>1</sup>:

- un metodo parametrico (PCSM) molto evoluto, del tipo a punteggi e pesi (SINTACS Release 5), ove i dati raccolti, le misure e le analisi necessarie si possono considerare sufficienti in funzione della scala di restituzione, particolarmente adatto per le aree pianeggianti e pedecollinari;
- un metodo di zonazione per aree omogenee, basato sul riconoscimento di complessi e situazioni idrogeologiche (CSI), impiegato per la valutazione delle aree collinari e montane (Metodo - Base GNDCI-CNR).

Da questa scelta deriva la sperimentazione di una nuova metodologia, detta *approccio combinato* (vedi § 3.4.), molto adatta a tante parti del territorio nazionale, per altro già sperimentata con successo in diverse zone d'Italia<sup>2</sup>.

Nel Capitolo successivo sono trattate le due metodiche, precedentemente indicate come le più adatte agli scenari idrogeologici italiani, e l'approccio combinato delle due.

### 2.3. Cartografia integrata della vulnerabilità

La Carta della Vulnerabilità integrata consiste nella sovrapposizione georeferenziata di almeno 3 diversi tematismi:

- la Carta della vulnerabilità intrinseca degli acquiferi dell'area d'interesse;
- il campo di moto dell'acquifero (o degli acquiferi);



<sup>1</sup> Le scelte si basano, com'è noto, su oltre 13 anni di ricerche e sperimentazioni in campo, effettuate dai ricercatori afferenti alla Linea di Ricerca n. 4 (Valutazione della vulnerabilità degli acquiferi) del GNDCI – CNR che operano nell'ambito del Progetto Speciale VAZAR, successivamente mutuato dal Progetto Speciale RIAS (Rischio d'Inquinamento delle Acque Sotterranee).

<sup>2</sup> Si veda, per esempio, la cartografia della vulnerabilità degli acquiferi della Provincia di Livorno [5 Fogli 1:25.000, M. Civita & M. De Maio (1998) – Inedita], nonché la cartografia della vulnerabilità degli acquiferi della Valle del Tanaro, frutto di un'apposito contratto di ricerca tra la Regione Piemonte ed il Gruppo di Lavoro in Idrogeologia Applicata - DIGET - Politecnico di Torino, terminato nel 2000.

– i centri di pericolo (CDP) e le fonti diffuse di pericolo (FDP) rilevate e censite, unitamente ai soggetti a rischio (SAR), ai trasmissori, ai riduttori d'inquinamento, ecc.

Uno schema di incrocio tra i dati di natura geologica e idrogeologica con tipologie di dati relative ai fattori di pressione (attività antropiche) e di risposta (riduttori o preventori di inquinamento) è illustrata in fig. 2.3.

In questo modo si assembla un documento di piano di grande utilità nella pianificazione delle acque, nella gestione del territorio, nella previsione e prevenzione dell'inquinamento potenziale, nella preparazione dei Piani regolatori ed in quelli di monitoraggio.

La Carta della vulnerabilità integrata dai suddetti tematismi è stata ritenuta per molto tempo<sup>3</sup> la massima possibile espressione tecnico - scientifica per la valutazione del rischio d'inquinamento delle acque sotterranee soggiacenti ad un dato territorio. Il documento deve essere, ovviamente, letto ed interpretato dal singolo operatore, a seconda degli obiettivi e delle finalità di piano, ma può essere utilizzata efficientemente, sia in fase programmatica (p.e. per concedere licenze di trasformazioni o sovrapposizioni territoriali – strade, ferrovie, reti fognanti, discariche, ecc.) sia nell'ambito della previsione e della prevenzione del danno da aspettarsi in zone a rischio (p.e. quali punti d'approvvigionamento possono essere considerati potenzialmente a rischio nelle aree idrogeologicamente dominate da CDP e FDP), sia in caso d'incidente (p.e., il rovesciamento di liquidi inquinanti da autoveicoli o da infrastrutture, quali gli oleodotti).

## 2.4. Acquisizione delle informazioni

Le possibilità di acquisire informazioni idrogeologiche, idrologiche ed ambientali utili alla costruzione di una Carta di vulnerabilità variano molto a seconda dello sviluppo del territorio d'interesse, delle condizioni morfologiche e climatiche e del grado di antropizzazione. Pertanto, mentre nelle porzioni di territorio densamente abitate e dotate di strutture pubbliche efficienti è possibile reperire molti dei dati necessari presso Agenzie e Servizi pubblici, Istituti universitari, studi professionali, Imprese di prospezione (perforazioni, geofisica, ecc.), Società di rilevazione statistica, ecc. (Tabella 2.3); molte difficoltà s'incontrano nelle aree economicamente depresse o scarsamente abitate. E', dunque, evidente che, in tali aree, non potendo avvalersi di informazioni scarse o addirittura inesistenti, sarà giocoforza rilevare direttamente i dati, con conseguente notevole aumento dei costi.

I metodi e le tecniche di raccolta, di rilevamento, di misura e di pre-trattamento dei dati fanno parte del normale bagaglio culturale dei tecnici che operano nel campo dello sfruttamento e della protezione delle risorse idriche sotterranee. Pertanto, si ritiene superfluo trattare qui di tecniche di rilevamento di campagna (geologico, idrogeologico, pedologico, geofisico, speleologico); delle metodologie per la conduzione di misure dirette (climatologiche, idrologiche, piezometriche, lisimetriche, idrochimiche); di test specialistici (pompaggio, assorbimento, traccianti) e relative elaborazioni. Tutte le informazioni operative relative a tali metodologie sono illustrate in Bibliografia e in Civita (1994) e in Civita & De Maio (2000). Si ritiene, invece, utile mettere in evidenza il notevole contributo che possono fornire metodi indiretti, ossia quelli basati sulle tecniche di rilevamento a distanza, tradizionali e *Remote Sensing (RS)*, relativamente poco costose e di grande avvenire nel campo della prospezione delle risorse territoriali e della sorveglianza ambientale.

<sup>3</sup> Nell'ultimo quinquennio sono state sperimentate nuove metodologie in grado di valutare e cartografare il rischio d'inquinamento globale (Civita, 1995; 2000) che ben presto passeranno dalla fase sperimentale a quella operativa e verranno offerte agli utilizzatori istituzionali.

**Tabella 2.3 – Settori disciplinari, tipologie, fonti e metodi d’acquisizione delle informazioni e dei dati necessari alla redazione della cartografia della vulnerabilità degli acquiferi (Fonte: Civita, 1994)**

Settore disciplinare	Tipologia delle informazioni	Fonti e metodologie di acquisizione
1. Topografia	Quote assolute, acclività della superficie topografica, coefficiente e densità di drenaggio.	Carte topografiche moderne (CTR), aerofotointerpretazione, Remote Sensing
2. Copertura vegetale	Uso del suolo, zone di flusso preferenziale, lineazioni, carico inquinante teorico (fitofarmaci, concimi, ...)	Cartografie specialistiche (p.e. Progetto Corine, areofotointerpretazione, Remote Sensing.
3. Climatologia	Serie storiche delle precipitazioni e delle temperature medie; Direzione e intensità del vento; Evapotraspirazione; Evaporazione; Precipitazioni efficaci (ricarica attiva + ruscellamento).	Annali idrologici, elaborazioni e modelli di calcolo numerico, dati da stazioni di misura, serie storiche.
4. Pedologia	Tipo, spessore, tessitura, composizione mineralogica, porosità, permeabilità, ritenzione specifica, caratteri chimico-fisici dei suoli.	Rilevamenti, analisi e test specifici, aero-fotointerpretazione, Remote Sensing, cartografie specialistiche.
5. Idrologia	Ruscellamento superficiale; idrogrammi e fasi di verse; tempi di corrivazione; flusso di base, aree esondabili.	Annali idrologici, misure di portata, (corsi d'acqua, sorgenti), individuazione di perdite e di travasi in alveo e in mare (Remote Sensing).
6. Idrogeologia		
a) Insaturo	Soggiacenza; Litologia, struttura, porosità utile, permeabilità verticale, velocità di filtrazione; Indici di fratturazione, di carsismo, d'infiltrazione; ricarica attiva; quote piezometriche; gradiente idraulico, soggiacenza.	Rilevamento idrogeologico, geognostica, geofisica, piezometria, test con infiltrometri e di assorbimento, da dati lisimetrici, test con traccianti, aerofotointerpretazione, Remote Sensing, rilievi speleologici.
b) Saturo	Litologia, struttura, permeabilità (tipo, grado) orizzontale e verticale, porosità utile, trasmissività, coefficiente di immagazzinamento, dispersione; tipologia dell'acquifero (libero, in pressione, semiconfinato,...); interconnessioni con altri acquiferi o con corpi idrici superficiali; direzione di flusso; posizione degli spartiacque sotterranei; velocità effettiva di flusso, portate unitarie e complessive	Rilevamento idrogeologico, geognostica, geofisica, test di assorbimento e di emungimento, test con traccianti, carte piezometriche, aerofotointerpretazione, Remote Sensing, esplorazione speleologica, modelli di calcolo numerico.
7. Uso delle acque	Ubicazione delle captazioni, aliquote derivate, aliquote distribuite, depressioni indotte da impianti di pompaggio (compresi quelli di dewatering), ubicazione e potenziale degli impianti di ravvenamento.	Piano generale degli acquedotti, piani di bacino e di risanamento, censimenti, rilevamenti, inchieste dirette presso Enti pubblici, Consorzi, privati.
8. Chimica		
a) Idrogeochimica	Caratteristiche fisiche e chimismo delle acque, identificazione dei traccianti ambientali, facies chimica, rapporti caratteristici, scambi con la matrice, età, tempi di residenza, qualità delle acque sotterranee	Analisi chimico - fisiche e batteriologiche, analisi isotopiche, ... (Enti pubblici, ASSL, laboratori universitari e privati, ARPA).
b) Inquinologia	Identificazione degli inquinanti, concentrazioni, densità, solubilità, viscosità, peso specifico, vita media, capacità di scambio cationico, biodegradabilità, mobilità, ...	Reti di monitoraggio, analisi specialistiche, determinazioni ed esperienze di laboratorio, dati tabulati (ARPA, ASSL, ...)
9. Antropizzazione	Posizione e natura degli insediamenti urbani e industriali, dei produttori reali e potenziali, degli ingestori, dei riduttori, dei preventori e dei soggetti d'inquinamento.	Censimenti, tabulati e cartografie di Enti pubblici, Camere di Commercio, ASSL, ARPA, ISTAT, Forestale, rilevamenti diretti e aerofotografici. Anagrafe siti L. 07/04/00 n.42.





## 3. Le metodologie

### 3.1. Il metodo sintacs - I principi teorici

La vulnerabilità di un corpo idrico sotterraneo è funzione di diversi parametri, tra i quali prevalgono la litologia, la struttura e la geometria del sistema idrogeologico, la natura del suolo e la geometria della copertura, il processo di ricarica-discarda del sistema ed i processi di interazione fisica e idrogeochimica che determinano la qualità naturale dell'acqua sotterranea e la mitigazione di eventuali inquinanti che penetrano il sistema.

Per aree ove la base dei dati sia completa e la frequenza delle informazioni adeguata, è possibile utilizzare sistemi modellistici basati su uno stesso principio:

- vengono selezionati i parametri mediante i quali si intende valutare la vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento, tenendo ben in conto l'effettiva tipologia, frequenza e validità delle informazioni di base necessarie esistenti ed ottenibili nel territorio di interesse;
- a ciascun parametro selezionato, suddiviso per intervalli di valore e/o tipologie dichiarate, viene attribuito un punteggio crescente in funzione dell'importanza che esso assume nella valutazione complessiva finale;
- i punteggi ottenuti per ciascun parametro sono moltiplicati per stringhe di pesi che descrivano la situazione idrogeologica e/o d'impatto, enfatizzando in varia misura l'azione e l'importanza dei vari parametri (pcsm = Point Count System Models, quale è appunto sintacs).

L'acronimo deriva dalle denominazioni dei parametri che vengono presi in considerazione:

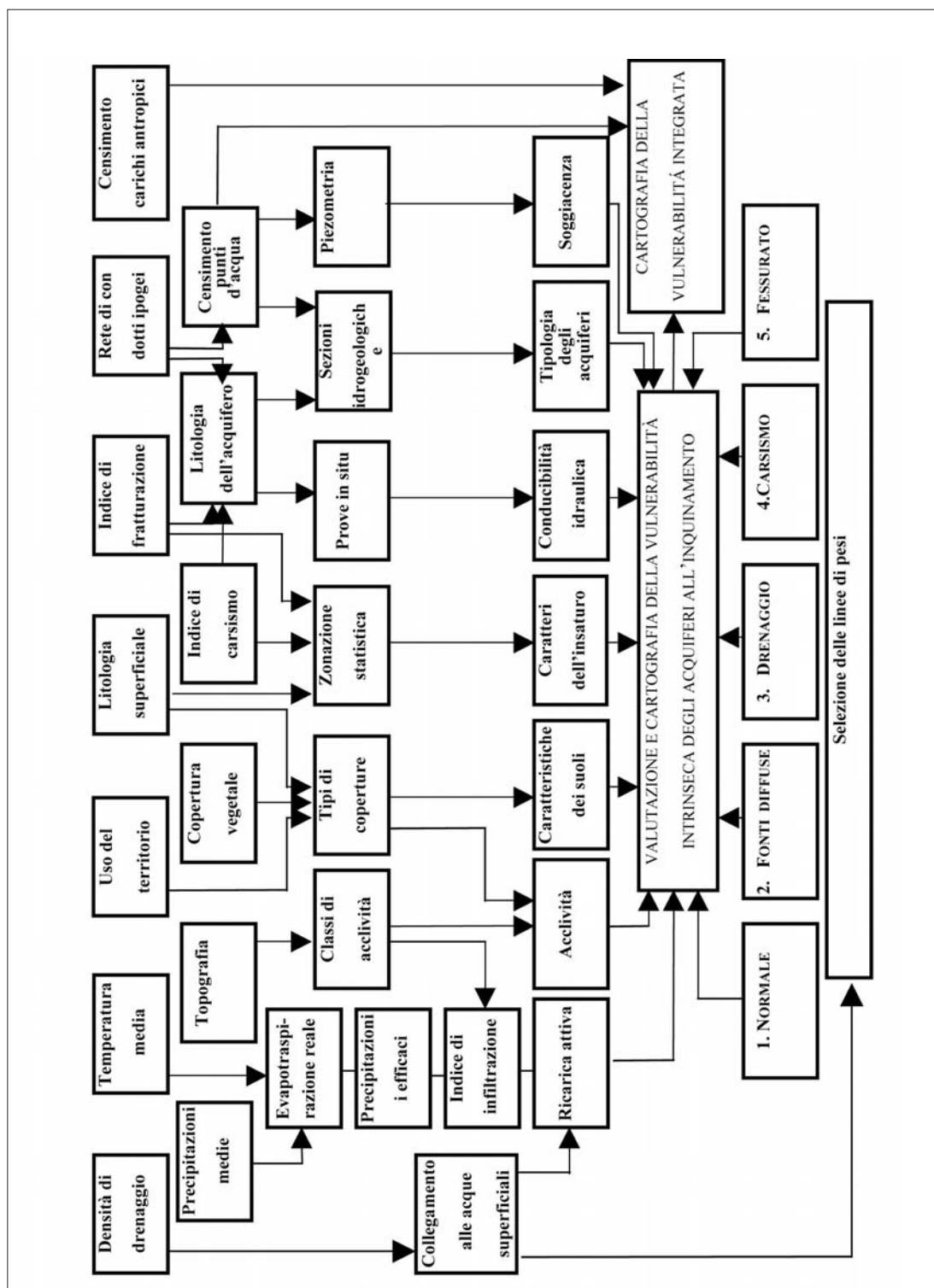
- Soggiacenza;
- Infiltrazione efficace;
- Non - saturo (effetto di autodepurazione del);
- Tipologia della copertura;
- Acquifero (caratteristiche idrogeologiche del);
- Conducibilità idraulica dell'acquifero;
- Superficie topografica (acclività della);

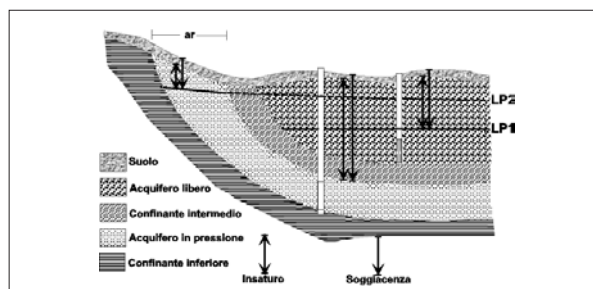
Questi parametri sono definiti in base ad una nutrita serie di dati, generalmente reperibili sul territorio italiano e della maggioranza dei Paesi sviluppati. Ai dati suddetti si affiancano altre informazioni, misure e risultati di prove in situ, in numero il più possibile limitato, con i quali è necessario integrare i dati normalmente esistenti.

Lo schema di fig. 3.2. sintetizza le diverse tipologie dei dati di base e la necessaria pre-elaborazione di essi per trasformarli nei parametri di sintacs nonché per definire le situazioni idrogeologiche e di impatto delle varie parti del territorio d'interesse onde selezionare le linee di pesi da utilizzare caso per caso. Ulteriori informazioni su dati e pre-elaborazione si trovano in Civita (1994) e in Civita & De Maio (2000).

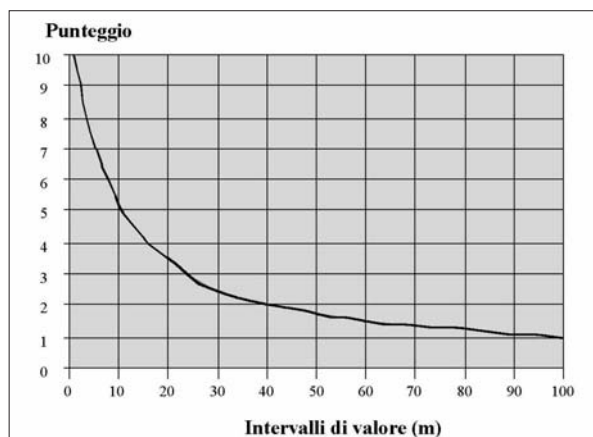
#### 3.1.1. Soggiacenza

Come è noto, si definisce soggiacenza la profondità della superficie piezometrica misurata rispetto al piano - campagna (fig. 3.1). Questo parametro ha una notevole influenza sulla vulnerabilità degli acquiferi : dal suo valore assoluto e dalle caratteristiche idrogeologiche dell'insaturo dipende, in buona misura, il tempo di transito (tot) di un qualsiasi inquinante idroportato e la durata delle azioni autodepurative dell'insaturo, in particolare dell'azione ossidante dell'ossigeno atmosferico.





**Figura 3.1** - Identificazione della soggiacenza (so) e dello spessore insaturo (in) in caso di acquifero libero e di acquifero confinato. LP2 = livello piezometrico dell'acquifero confinato; LP1 = livello piezometrico dell'acquifero libero; ar = zona di ricarica attiva dell'acquifero confinato.



**Figura 3.3** - Valori della soggiacenza e relativi punteggi

do l'intervallo in cui rientra il valore del parametro. Nella determinazione della soggiacenza sul campo sussistono alcuni problemi che sono stati risolti pragmaticamente. In particolare, la soggiacenza per un acquifero confinato corrisponde sempre alla profondità del letto del confinante superiore, misurata dal piano - campagna (fig. 3.1). In presenza di un acquifero semiconfinato (o presunto tale), è necessario stabilire, in base ai dati disponibili, se sussistono travasi attivi tra la superficie (o/e l'eventuale acquifero libero) ed il semiconfinato o si è in presenza di fenomeni di leakage. Ove sussista il primo caso, il mezzo semiconfinante è considerato parte dell'insaturo e la sua presenza influirà sul punteggio da attribuire a tale parametro. Nel secondo caso, la pressione dell'acquifero si oppone alla penetrazione degli inquinanti e pertanto il punteggio da assegnarsi alla soggiacenza deve tenerne conto.

Per quanto riguarda gli acquiferi liberi, è possibile derivare e territorializzare le misure di soggiacenza da Carte piezometriche eventualmente esistenti, dopo opportuno controllo di affidabilità delle elaborazioni e della congruità della scala di rappresentazione con quella dell'elaborazione in corso. In fine, è utile ricordare che, in corrispondenza di corpi idrici superficiali (fiumi, canali non rivestiti, bacini idrici, ecc.) e di alcune tipologie di cdp (lagunaggi, cave, ecc.), può non esserci alcuna soluzione di continuità tra liquidi inquinanti o/e inquinati e la zona satura dell'acquifero, nel qual caso la soggiacenza deve considerarsi nulla.

Pertanto, nel selezionare i dati relativi da utilizzare in sintacs, è necessario considerare il valore minimo di soggiacenza registrato nell'anno idrologico corrispondente alla massima escursione del livello piezometrico dell'acquifero d'interesse. Ciò al fine di porsi nella condizione più cautelativa possibile nella valutazione della vulnerabilità, il valore della quale è, in ogni caso, inversamente proporzionale al tot.

Il punteggio sintacs relativo al parametro in discussione (S), dunque, diminuisce con l'aumentare della profondità, cioè con l'aumentare dello spessore dell'insaturo, assumendo valori compresi tra 10 e 1, come illustrato nel grafico di fig. 3.3.

Si è adottato un decremento di tipo iperbolico del punteggio sintacs con la soggiacenza. Come si può osservare nella figura, per valori di soggiacenza superiori ai 60 m il punteggio tende asintoticamente a 1, il che esprime in modo paradigmatico le leggi di attenuazione legate a questo parametro per quanto attiene ai più diffusi inquinanti. Il parametro soggiacenza ha un peso sempre elevato nel calcolo finale dell'indice sintacs. La precisione del dato deve essere valutata consideran-



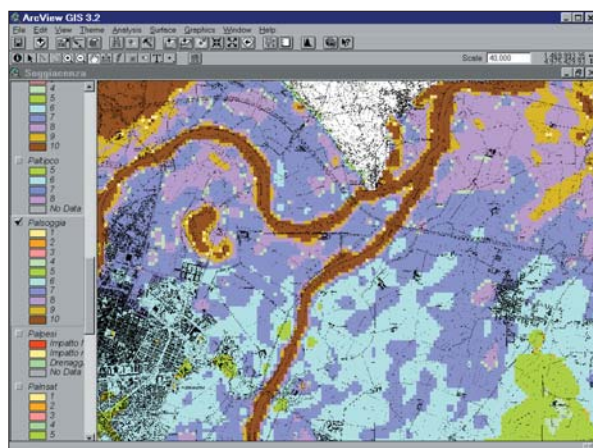


Figura 3.4. – Esempio di cartografia GIS del parametro Soggiacenza, area di Alessandria (da Regione Piemonte [2000]).

### 3.1.2. Infiltrazione

L'infiltrazione efficace assume notevole importanza nella valutazione della vulnerabilità poiché essa regge il trascinamento in profondità degli inquinanti, ma anche la loro diluizione, dapprima nell'insaturo e quindi nella zona di saturazione. Essa è la componente unica o largamente preponderante per tutte le aree ove non sussistono interscambi tra acquiferi e corpi idrici superficiali e dove non sono esercitate pratiche irrigue che utilizzano grandi volumi d'acqua. La valutazione della ricarica attiva, in questi ultimi casi, diviene problematica e non può prescindere dalla complessità delle misure necessarie per la

redazione di un bilancio idrogeologico globale (Schoeller, 1968; Lerner et al., 1990) che tenga conto non solo degli afflussi ed efflussi naturali ma anche delle ricariche dai corpi idrici superficiali, di quelle artificiali e dei prelievi relativi. I relativi dati, per altro difficilmente reperibili sul territorio italiano, sono comunque molto scarsamente territorializzabili anche con l'utilizzo di tecniche GIS.

Pertanto, nella struttura di sintacs è stato affrontato il problema delle ricariche dalla superficie agendo più che sul singolo parametro, sul peso che l'insieme viene ad avere laddove si verificano o s'ipotizzano travasi (linea di pesi n° 3) o forti incrementi dovuti a irrigazione intensiva e continuata di territori con agricoltura a forte supporto chimico (linea di pesi n° 2 - cfr. 3.1.8).

La metodologia di valutazione e di territorializzazione del parametro in discussione (I), presente nelle ultime versioni di sintacs, si basa su una semplificazione della tecnica del bilancio idrogeologico (Civita & De Maio, 1997; 2000 [con relativa bibliografia]; Civita et al. 1999). Di norma, dunque, il parametro si calcola dalla piovosità efficace e dalle condizioni idrogeologiche superficiali che sono conglobate nell'indice d'infiltrazione (c). Tale indice è determinato in base alla litologia superficiale (se affiorante o sotto scarsa copertura di suolo) o alle caratteristiche idrauliche del suolo (se questo è potente), all'acclività della superficie topografica, all'indice di fratturazione (if), all'indice di carsismo (ic) e ad altri parametri correttivi che dipendono dalla soggiacenza, dall'uso del suolo, dalla tipologia e densità della rete drenante superficiale, ecc.

Le informazioni di base necessarie per la valutazione e la territorializzazione dell'infiltrazione consistono nelle serie storiche almeno ventennali, continue o ricostruite ed omogeneizzate, dei dati pluviometrici e termometrici mensili misurati a tutte le stazioni esistenti nell'area d'interesse ed ai margini di essa. In base a queste ed alle quote medie delle stazioni e dei singoli eq del grigliato di riferimento, sono calcolati i valori delle precipitazioni medie annue ( $\bar{P}$ ) e dell'evapotraspirazione reale media annua ( $\bar{E}_r$ ) ragguagliati alla quota.

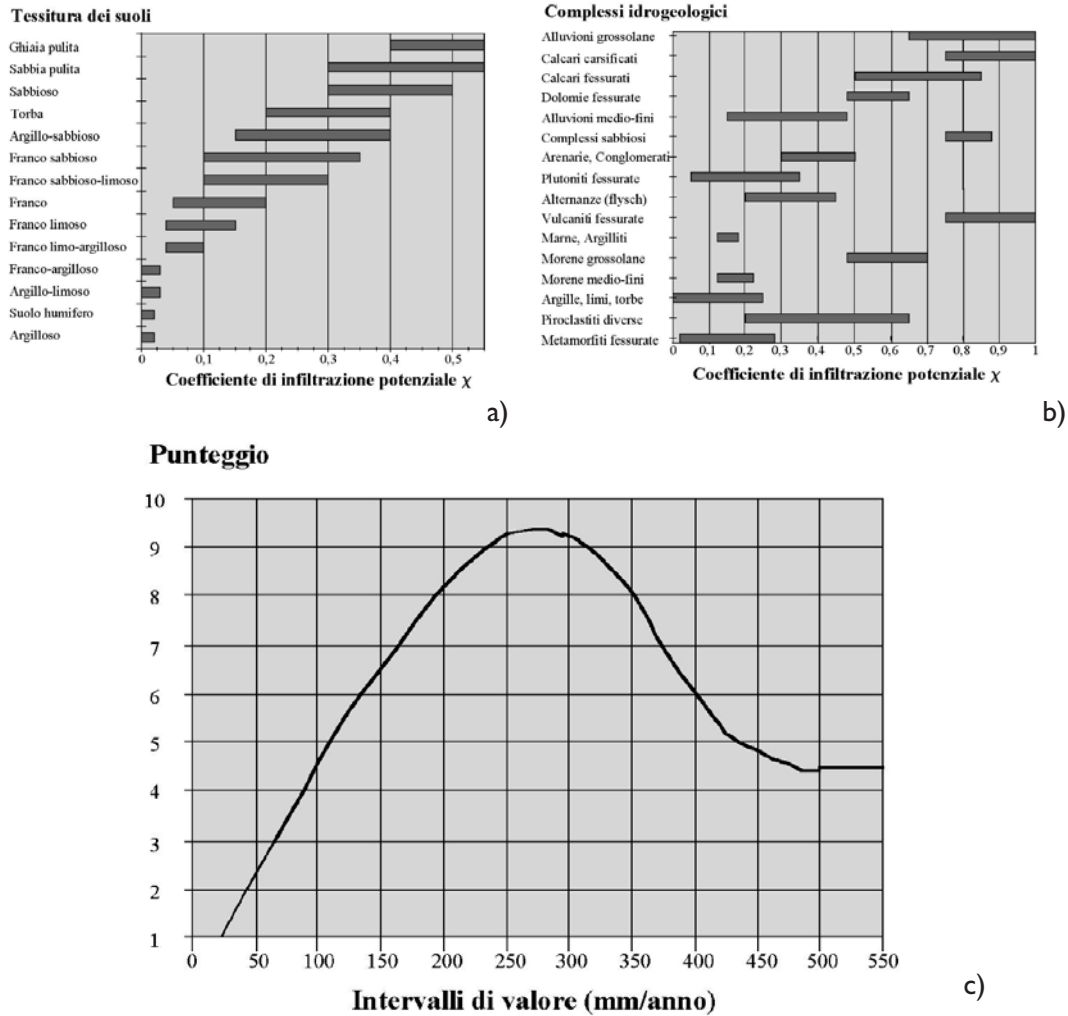


Figura 3.5. – a) Grafico per la valutazione del  $\chi$  nel caso di rocce affioranti o sotto scarsa copertura. b). Grafico per la valutazione del  $\chi$  nel caso di suoli spessi. c) Valori dell'infiltrazione e relativi punteggi.

Possono seguirsi due diverse vie di approccio alla valutazione del parametro Infiltrazione, nel caso di rocce nude o poco coperte ed in quello di suolo potente<sup>4</sup>. Nel primo caso è necessario calcolare per ogni EFQ i-esimo di maglia il valore delle precipitazioni efficaci medie annue  $\bar{Q}$  :

$$\bar{Q} = \bar{P} - \bar{E}_r \text{ (mm/a)} \quad (3-1)$$

Il valore ottenuto viene moltiplicato per quello dell'indice proprio del tipo di roccia presente nell'efq i-esimo (fig. 3.5. a):

$$\bar{I} = \bar{Q} \chi \text{ (mm/a)} \quad (3-2)$$

<sup>4</sup> Si intende, di norma, per scarsa copertura uno spessore del pedon inferiore a 50 cm (Busoni et al., 1995). In questo contesto, per ragioni collegate alla velocità di infiltrazione, si considera efficace l'azione di suoli con potenza pari o superiore al metro.



Nel caso di suoli spessi, viene usato il valore intero di  $\bar{P}$  per l'indice  $\chi$  esposto in fig. 3.5 b) in funzione del tipo di tessitura (England, 1973):

$$\bar{I} = \bar{P} \chi \text{ (mm/a)} \quad (3-3)$$

Per gli EFQ<sub>i</sub> coincidenti con la rete fluviale o con aree irrigue, il valore dell'infiltrazione media annua dovrà essere integrato utilizzando i metodi suggeriti da Civita (1994) per completare la valutazione della ricarica attiva. Una volta ottenuto il valore del parametro, si ricava il relativo punteggio dal diagramma di fig. 3.5 c). La curva empirica è stata calibrata sui dati medi del cinquantennio 1921-1970, si ricava che la

gran parte del territorio italiano riceve precipitazioni medie tra 600 e 1400 mm/anno per cui, tenuto conto delle medie termometriche isocrone, è possibile valutare un intervallo di valori di precipitazione efficace tra 100 e 600 mm/anno. Come appare dal diagramma, sintacs attribuisce il punteggio massimo all'intervallo d'infiltrazione 250-300 mm, ma tende a diminuire per valori maggiori onde tenere conto dei processi di diluizione e di dispersione attraverso l'insaturo.

E', comunque, buona norma correggere i punteggi assoluti ricavati dal diagramma tenendo conto, anche senza un'accurata quantificazione, di situazioni idrogeologiche particolari : nel caso di acquiferi confinati, spesso l'infiltrazione efficace diretta (zenitale) è scarsa o nulla, tranne che nelle aree di alimentazione effettiva ; di contro, nelle aree ove lo sfruttamento dell'acquifero genera forti gradienti influenti dai corpi idrici superficiali, la ricarica attiva deve essere considerata maggiore di quella calcolata ed è necessario tenerne conto nella scelta degli intervalli di punteggio da assegnare.

La metodologia di valutazione dell'infiltrazione è illustrata compiutamente in Civita & De Maio (2000). Il procedimento è stato completamente informatizzato in ambiente GIS.

### 3.1.3. Effetto di autodepurazione del non saturo

La zona insatura è la parte di sottosuolo compresa tra la base del suolo e la zona satura dell'acquifero. Tale zona, ove avvengono spostamenti prevalentemente verticali dell'acqua sotterranea, è dunque limitata verso il basso dalla superficie piezometrica di un acquifero libero. Nel caso di un acquifero in pressione, il limite inferiore della zona insatura corrisponde invece alla base del livello confinante superiore (fig. 3.1) Da tale definizione traspare chiaramente che, mentre lo spessore insaturo di un acquifero in pressione è fisso per ciascun punto d'osservazione, esso varia ed anche in modo notevole per gli acquiferi liberi seguendo le fluttuazioni della superficie piezometrica.

Come è noto, l'insaturo rappresenta la seconda linea di difesa (la prima è, come vedremo, il suolo) del sistema acquifero nei confronti degli inquinanti liquidi e/o idroveicolati. All'interno dello spessore insaturo si giuoca una partita su quattro dimensioni nella quale fattori fisici e chimici operano in sinergia favorendo i processi di attenuazione nel tempo:

- la filtrazione;
- la dispersione;

- la reattività chimica dei minerali componenti i mezzi, che influenza processi come:
- gli scambi cationici,
- le reazioni acido - base,
- la complessazione,
- l'adsorbimento - desorbimento;
- i processi di biodegradazione e volatilizzazione.

Mentre per i mezzi a permeabilità matriciale la valutazione di tutti questi fattori è abbastanza agevole, più difficile appare la stima dell'azione di mitigazione dell'insaturo quando questo comprende rocce fessurate. In questi casi, molto importanti sono la luce delle discontinuità, la loro geometria, orientazione, densità (indice di fratturazione) e interconnessione.

L'effetto di autodepurazione del non-saturo si valuta, dunque, a partire dalle condizioni litologiche dello spessore insaturo (litologia, stato di fratturazione, grado di carsismo, ecc.). Si attribuisce un punteggio alla litologia del parallelepipedo insaturo avente per base la singola maglia (EFQ) di discretizzazione: ciò può essere immediato se tale litologia è uniforme. In questo caso, basta entrare nel diagramma di fig. 3.7, identificare il litotipo voluto, effettuare il *posizionamento all'interno dell'intervallo di punteggio indicato* e ricavare il punteggio cercato.

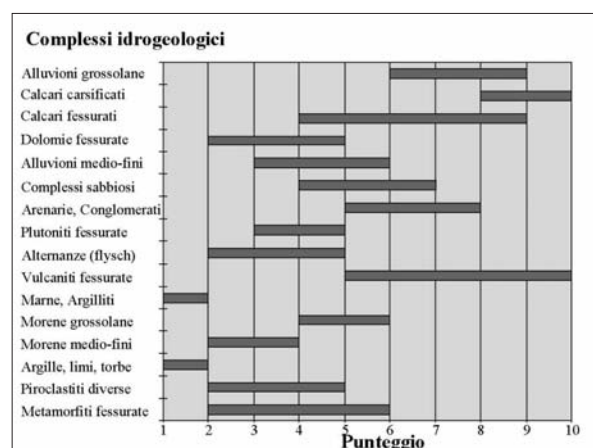


Figura 3.7 - Azione di mitigazione delle rocce componenti l'insaturo e relativi punteggi.

Il criterio per effettuare il posizionamento suddetto si basa sul confronto tra le caratteristiche reali accertate e l'ampiezza dell'intervallo di punteggio, usando le diverse discriminanti idrogeologiche che si confanno con il litotipo in questione. Per i mezzi porosi fungono, in genere, da discriminanti la granulometria e il grado d'uniformità del materiale, parametri che controllano le dimensioni dei meati (quindi la porosità cinematica) e la lunghezza e tortuosità dei percorsi (quindi la dispersione meccanica).

Prendendo ad esempio un insaturo costituito da *sabbie più o meno fini, limose, con scarsa ghiaia*, si entra nel diagramma al livello delle alluvioni medio-fini, il cui intervallo di punteggio è  $3 \div 6$ . Le sabbie fini si collocherebbero già nella metà inferiore dell'intervallo a causa della scarsa porosità cinematica e bassa velocità d'infiltrazione, che influiscono sul TOT. La presenza di scarsa ghiaia non influisce sull'azione depurativa se non per possibili, comunque episodiche, interazioni tra liquido e solido (adsorbimento, scambio ionico). Molto influente, invece, è la presenza di frazioni molto fini (limo, argilla), sia a livello cinematico sia geochimico. In definitiva, l'attribuzione di un punteggio pari a 2 al parametro **N** (effetto di autodepurazione dell'insaturo) è ragionevole.

Ma quando lo spessore insaturo è costituito da diversi tipi litologici, è necessario calcolare la media ponderale riferita allo spessore, che è data dal rapporto tra la sommatoria del prodotto del punteggio (**R**) di ogni singolo litotipo per il suo spessore (**h**) e la potenza totale del non-saturo :



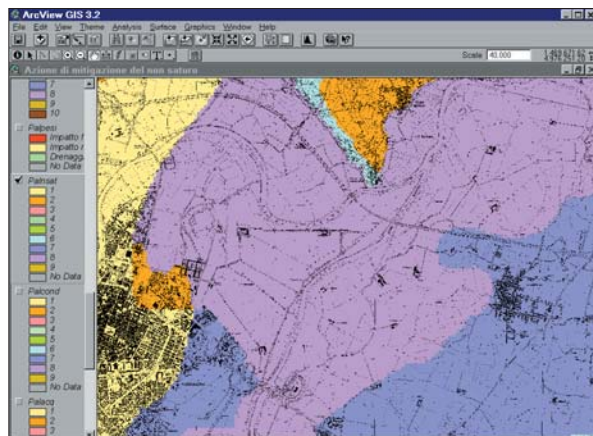


Figura 3.8 – Esempio di cartografia GIS del parametro Non-saturo, area di Alessandria (da Regione Piemonte [2000])

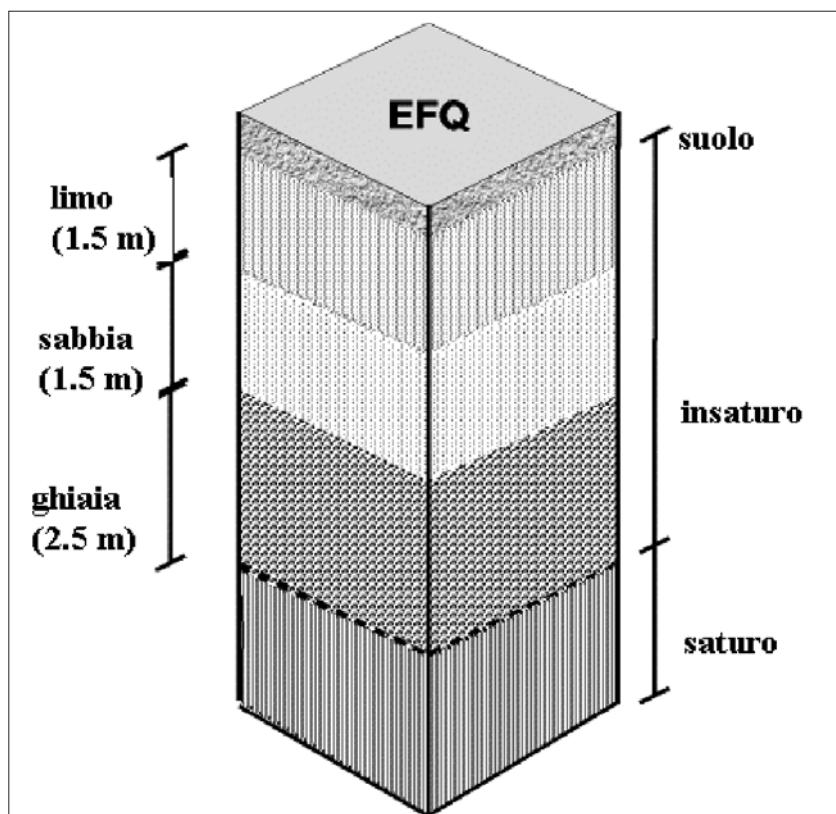
$$N = \frac{\sum_{j=1}^n h_j R_j}{\sum_{j=1}^n h_j} \quad (3-4)$$

Nell'esempio in fig. 3.9, l'insaturo, spesso 5.5 m, è formato da 3 diversi livelli :

- limo, per 1.5 m ;
- sabbia, per 1.5 m ;
- ghiaia, per 2.5 m.

Dal diagramma in fig. 3.7 si desume un punteggio pari a 2 per il limo, 4 per le sabbie e 8 per le ghiaie, si calcola la media pesata:

$$N = \frac{(1.5 \leftrightarrow 2) + (1.5 \leftrightarrow 4) + (2.5 \leftrightarrow 8)}{5.5} \cong 5 \quad (3-5)$$



Nel caso citato, dunque, il punteggio da attribuire alla cella risulta pari a 5.

### 3.1.4. Tipologia della copertura

Come è noto, la tipologia dei terreni di copertura, in genere, e dei suoli, in particolare, riveste un ruolo della massima importanza nella mitigazione dell'impatto degli inquinanti e nella valutazione della vulnerabilità intrinseca degli acquiferi e, quindi, nella stesura delle moderne Carte di vulnerabilità.

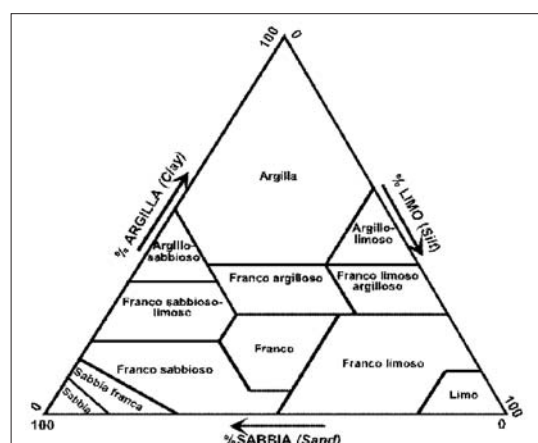
Il suolo è qui identificato come sottosistema aperto, trifase, accumulatore e trasformatore di energia e materia, che si sviluppa per alterazione e trasformazione fisico - chimica e biologica dei litotipi del substrato e delle sostanze organiche che vi si accumulano. Esso costituisce, come si è detto, la prima linea di difesa del sistema acquifero : è al suo interno che si esplicano importanti processi che collettivamente costituiscono il potenziale di attenuazione del suolo. Due gruppi di parametri pedologici devono prendersi in considerazione nella valutazione di tale potenziale. I parametri del primo gruppo controllano direttamente la situazione fisica reale ed i processi che la caratterizzano (assorbimento, filtrazione, capacità di drenaggio, grado di umidità, velocità di infiltrazione, ecc.) :

- la granulometria;
- la tessitura;
- lo spessore effettivo.

La granulometria dei suoli, che normalmente è il parametro più disponibile, viene ricavata da campionamenti ed analisi come distribuzione delle classi dimensionali delle particelle minerali del suolo. Nella classificazione internazionale si assumono quattro classi granulometriche (Tabella 3.1).

**Tabella 3.1. - Classi granulometriche dei suoli e relativi limiti dimensionali dei granuli secondo il sistema internazionale.**

Classe granulometrica	Intervalli dimensionali (mm)
Sabbia grossa	$2.0 \div 0.2$
Sabbia fine	$0.2 \div 0.02$
Limo	$0.02 \div 0.002$
Argilla	$< 0.002$



**Figura 3.10 - Diagramma triangolare per la classificazione tessiturale del suolo. (Fonte: Soil Conservation Service, 1951)**

Dalla distribuzione percentuale delle tre frazioni granulometriche con diametro inferiore a 2 mm (sabbia, limo, argilla) si caratterizza la tessitura mediante diagrammi triangolari come quello, tra i più utilizzati in campo applicativo, proposto dall'United States Department of Agriculture (USDA - Soil Conservation Service, 1951) riportato in fig. 3.10.

Lo spessore effettivo della copertura va valutato a partire dalla superficie, comprendendo tutti gli orizzonti sino al contatto con la roccia in posto dalla quale il suolo si è evoluto. Nelle descrizioni cartografiche e nella tassonomia è possibile trovare indicazioni qualitative alle quali vanno associati, di consuetudine, altrettanti intervalli di profondità (Tabella 3.2.).

Tabella 3.2 - Intervalli di profondità dei suoli normalmente utilizzati.

Classi	Intervalli (m)
Sottile o poco profondo	< 0.5
Mediamente profondo	0.5 ÷ 1.0
Profondo	>1.0

Nel secondo gruppo figurano i parametri che influiscono direttamente sul valore numerico del coefficiente  $K_d^5$  che misura il grado di adsorbimento di un composto chimico da parte del suolo, tra i quali il pH e la capacità di scambio cationico (CSC) ma, essenzialmente:

- il contenuto di sostanza organica (SO);
- il contenuto in argilla e limo (AL).

Mentre sia il pH sia la CSC, pur molto importanti nell'azione di blocco degli inquinanti, sono parametri piuttosto variabili, più facilmente utilizzabili sono SO e AL nelle valutazioni della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento.

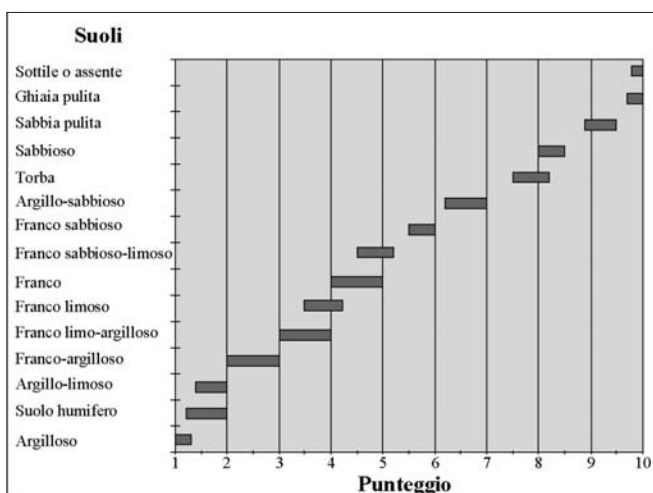


Figura 3.11 - Caratteristiche tessiturali dei suoli e relativi punteggi per la valutazione dell'azione di mitigazione degli inquinanti.

Pertanto, facendo riferimento alle caratteristiche di tessitura dei suoli ed ai parametri discussi in precedenza, sono stati quantificati gli intervalli di punteggio SINTACS presentati in fig. 3.11. In tale diagramma e a seconda del numero e della tipologia dei dati disponibili, si potrà cercare il valore più soddisfacente da assegnare ai diversi EFQ della matrice di discretizzazione del territorio di interesse che è alla base dell'applicazione del metodo e della relativa restituzione cartografica.

Per una cartografia della vulnerabilità di tipo operativo ( $25.000^{-1} \div 50.000^{-1}$ ), è indispensabile una frequenza di campio-

namento e rilevamento pari ad almeno un profilo del suolo (con le indispensabili analisi di laboratorio relative) ogni  $5 \text{ km}^2$ . Le informazioni puntuali reperite possono, comunque, essere territorializzate abbastanza agevolmente e con precisione utilizzando in modo estensivo le tecniche di fotointerpretazione e di telerilevamento multibanda.

Qualora, tuttavia, esista o venga effettuata espressamente una copertura di dati specifici<sup>6</sup>, una diversa procedura, più diretta ed assai più potente è stata messa a punto per una stima diretta della capacità di attenuazione degli inquinanti da parte del suolo. Questa procedura, che diviene regola nella Release 5 di SINTACS ha solide basi e fondamenti teori-

<sup>6</sup> Prelievi ed analisi chimico-fisica e granulometrica dei suoli, adeguatamente numerosi e distribuiti sul territorio d'interesse.



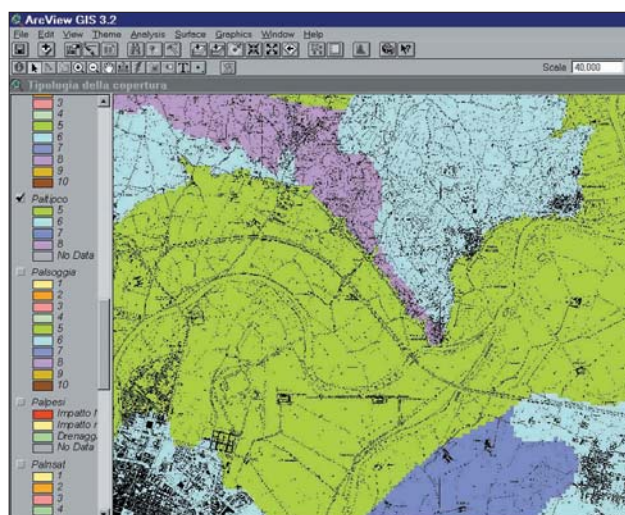


Figura 3.12 – Esempio di cartografia GIS del parametro Tipologia della copertura, area di Alessandria (da Regione Piemonte [2000]).

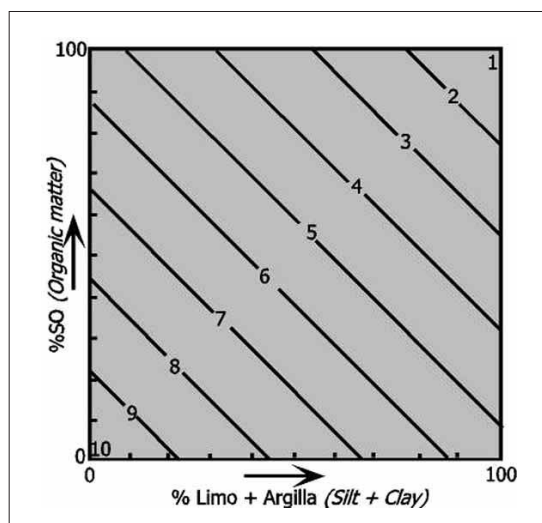


Figura 3.13 – Correlazione tra il contenuto in sostanza organica e la somma di limo e argilla dei suoli per la lettura diretta del punteggio del fattore Tipologia della Copertura.

ci. Rimandando per ogni approfondimento a Civita & Persicani (1996) è stato preparato un diagramma con in ascisse AL% e in ordinate SO% che correla direttamente il peso dei parametri con il punteggio da attribuire al fattore **T** di SINTACS (fig. 3.13).

### 3.1.5. Caratteristiche idrogeologiche dell'acquifero

La tipologia dell'acquifero (**A**) è il parametro di SINTACS che descrive i processi che avvengono al di sotto della superficie piezometrica, quando un inquinante idroveicolato giunge a mescolarsi con l'acqua sotterranea dopo aver superato le due linee di difesa costituite dalla

copertura e dall'insaturo, con abbattimento di una parte più o meno rilevante della sua concentrazione iniziale. Tali processi, in buona sostanza, sono :

- la dispersione;
- la diluizione;
- l'assorbimento;
- la reattività chimica del mezzo.

La dispersione cinematica dipende essenzialmente dalla lunghezza e tortuosità dei percorsi che i filetti fluidi seguono nella zona satura. Nei mezzi porosi, essa è retta dalla granulometria e dal grado di compattazione, mentre nelle rocce fessurate tale funzione viene svolta dallo stato di fratturazione e/o di carsificazione. La diluizione è collegata alla portata unitaria dell'acquifero, alla ricarica attiva, alla velocità effettiva di flusso. La composizione chimica della roccia acquifera potrà inte-

ragire in misura maggiore o minore con l'inquinante. Processi come l'ossidazione di minerali ferrosi, l'idrolisi delle rocce feldspatiche e l'idratazione dei solfati possono giocare un ruolo importante.

Il rilevamento idrogeologico, integrato da tutti i dati ottenibili sulla struttura, sulla litologia, sullo stato di fessurazione e di carsificazione della zona satura (indagini geofisiche, geognostiche, esplorazione speleologica, geostatistica, ecc.), costituisce soltanto la base delle informazioni necessarie per la parametrizzazione o, comunque, per la valutazione delle con-



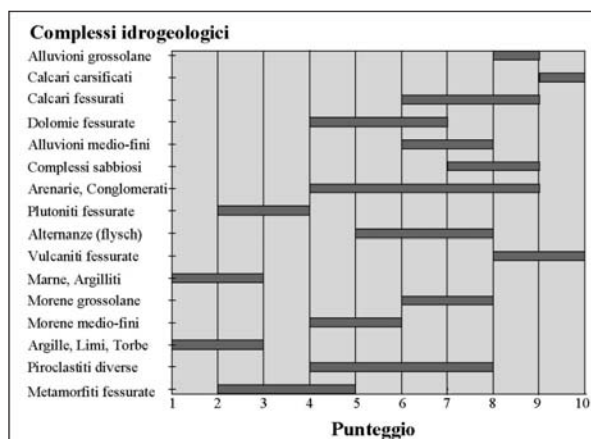


Figura 3.14 - Caratteristiche dei complessi rocciosi contenenti la zona saturata del sistema acquifero e relativi punteggi.

dizioni di vulnerabilità. Su tale base, viene di solito ricostruita la struttura e la tipologia dell'acquifero (libero, confinato, semiconfinato) ma ad essa si devono opportunamente aggiungere i risultati di test specialistici e di analisi di dati necessari per valutare:

- le direzioni del flusso, la posizione degli spartiacque sotterranei fissi e mobili, la possibile interconnessione tra acquiferi diversi dello stesso sistema;
- le portate unitarie e complessive dell'acquifero.

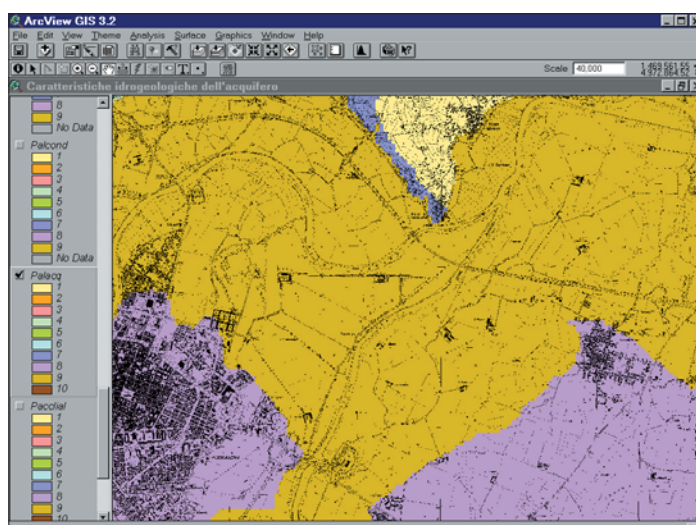


Figura 3.15 – Esempio di cartografia GIS del parametro caratteristiche idrogeologiche dell'Acquifero, area di Alessandria (da Regione Piemonte [2000]).

Sulla base dei dati disponibili e tenendo conto dei criteri di discriminazione ricordati in precedenza, l'utilizzatore dovrà cercare, per ciascun elemento di maglia, il valore più soddisfacente all'interno degli intervalli riportati nel grafico in fig. 3.14 ove sono riportati i principali litotipi costituenti gli acquiferi.

### 3.1.6 Conducibilità idraulica dell'acquifero

La conducibilità idraulica è la capacità di spostamento dell'acqua sotterranea nel mezzo saturo e, dunque, di un inquinante idroportato o con le stesse caratteristiche di densità dell'acqua sotterranea.

Questo parametro (**C**) nel contesto di SINTACS regge, a parità di gradiente e di sezione retta attraversata, la portata unitaria dell'acquifero e la velocità di spostamento verso i punti di recapito o le captazioni. Si tratta, però, di un parametro di difficile valutazione, in particolare in zone montuose ove non esistono pozzi dai quali ricavarne i valori, unitamente agli altri parametri idrogeologici fondamentali, ottenibili mediante *slug test* al di sotto della piezometrica, test di pompaggio, test con traccianti. Le prove di pompaggio rimangono, comunque, il mezzo più affidabile per calcolare la trasmissività, la conducibilità idraulica, la diffusività, il coefficiente d'immagazzinamento dell'acquifero d'interesse. Molti valori di conducibilità possono venire ottenuti dalle prove di funzionalità dei pozzi, per i quali esiste quasi sempre un dato di depressione in funzione della portata edotta: da tali dati si calcola la portata specifica (**Q/s**) e, quindi, una stima di **K** sufficientemente precisa per gli scopi del modello. In linea di larga massima, comunque sufficien-

te in valutazioni del grado di vulnerabilità intrinseca, si possono ritenere valide correlazioni lineari del tipo:

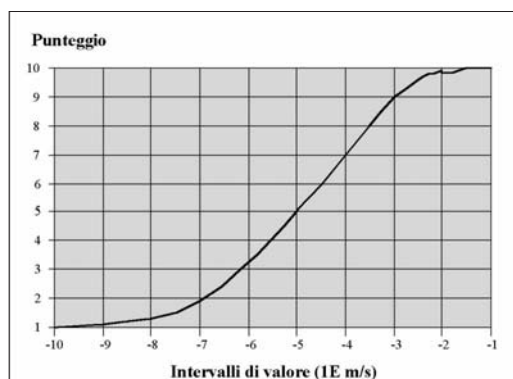


Figura 3.16. - Intervalli di valore della conducibilità idraulica e relativi punteggi.

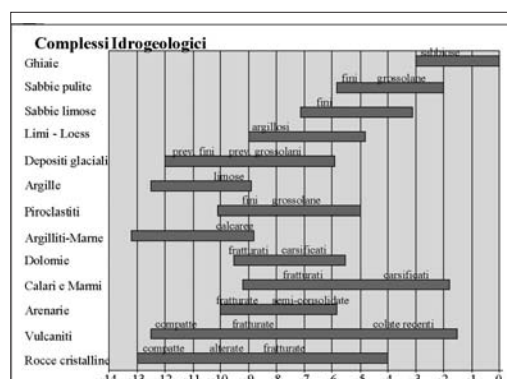


Figura 3.17 - Intervalli di conducibilità idraulica dei principali complessi acquiferi.

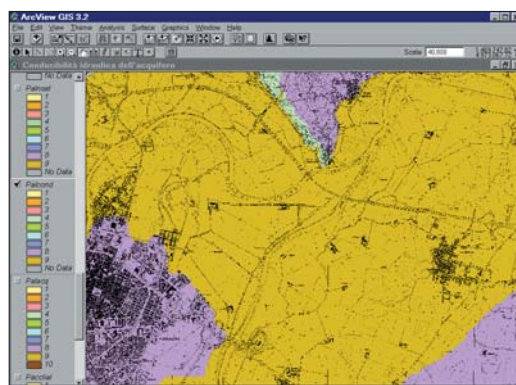


Figura 3.18 – Esempio di cartografia GIS del parametro Conducibilità idraulica dell'acquifero, area di Alessandria (da Regione Piemonte [2000]).

- $T$  (acquifero confinato)  $\cong 1.5 \text{ Q/s}$
- $T$  (acquifero semiconfinato)  $\cong 1.2 \text{ Q/s}$
- $T$  (acquiferi liberi)  $\cong 0.75 \div 1 \text{ Q/s'}$  con  $s' = s - (s_2/2H)$ .

Noto che sia il valore di  $H$  (spessore del saturo), si ricava la conducibilità idraulica dalla trasmissività.

Dati di conducibilità idraulica che caratterizzino affidabilmente gli acquiferi sono, in ogni caso, molto raramente disponibili. Per questa ragione, SINTACS offre, oltre all'approccio diretto basato sui valori di  $K$  (fig. 3.16), anche un metodo di stima indiretta che si basa sul grafico di fig. 3.17. In questo grafico, vengono ri-

portati i principali tipi litologici di acquifero per intervalli di valori assoluti della conducibilità idraulica, unitamente con i caratteri discriminanti che permettono di effettuare una scelta più accurata spostandosi all'interno dell'intervallo indicato. Una volta identificato il valore soddisfacente per la situazione (EFQ) in esame si deve leggere il punteggio nel grafico di fig. 3.17.

### 3.1.7 Acclività della superficie topografica

L'acclività della superficie topografica influisce sulla valutazione della vulnerabilità intrinseca soprattutto perché da essa dipende la quantità di ruscellamento che si produce a parità di precipitazione e la velocità di spostamento dell'acqua (e, dunque, di un inquinante fluido o idroveicolato) sulla superficie. In pratica, si attribuisce un punteggio elevato alle pendenze molto blande corrispondenti a parti del territorio dove un inquinante può spostarsi poco sotto l'azione della gravità o addirittura ristagnare favorendo l'infiltrazione. Inoltre, l'acclività influenza in misura più o meno grande la tipologia e lo spessore del suolo e della copertura, anche questi parametri importanti del potenziale d'attenuazione. In fine, c'è sempre una possibile interrelazione tra il gradiente topografico ed il gradiente

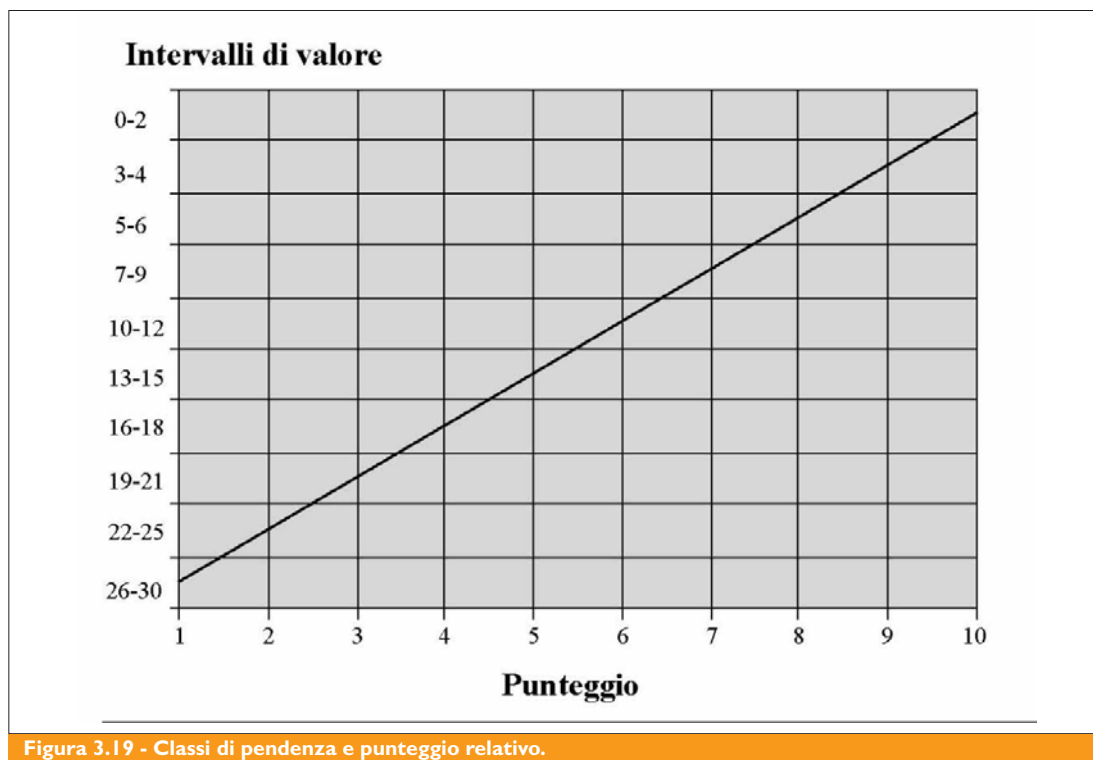


Figura 3.19 - Classi di pendenza e punteggio relativo.

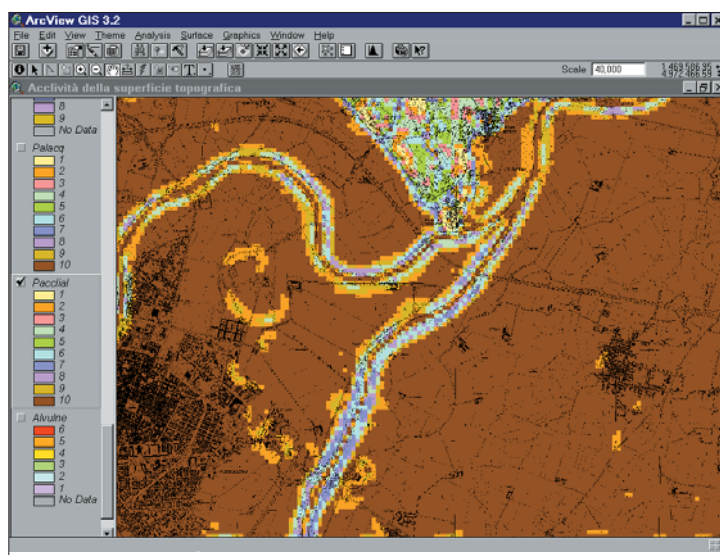


Figura 3.20 – Esempio di cartografia GIS del parametro acclività della Superficie topografica, area di Alessandria (da Regione Piemonte [2000]).

idraulico d'acquiferi liberi prossimi alla superficie, come appare evidente ad esempio nelle aree moreniche e collinari a circolazione sotterranea epidermica. Operativamente, si stabiliscono delle classi d'acclività (comprese fra 0 e 30 % - fig.3.19), attribuendo il massimo punteggio SINTACS alle aree con superficie topografica pianeggiante, dove quindi il ristagno ed il trasferimento in profondità dell'inquinante sono maggiormente favoriti. Le classi di pendenza possono essere rilevate dalla carta topografica o lette in cartografia delle

acclività eventualmente già esistenti o, ancora, dedotte da un DEM (Digital Elevation Model – cfr. Capitolo 4), ove disponibile.



### 3.1.8 Descrizione delle linee di pesi

#### 3.1.8.1 Generalità

La struttura modulare (per maglie) dell'*input* di SINTACS è stata concepita per poter usare varie *stringhe* (i.e. linee di pesi moltiplicatori) in alternativa ed in parallelo. Le linee di pesi sono un potente strumento che permette di modellare la metodologia sulla situazione effettiva identificata (*scenario*) per ciascun elemento di maglia, esaltando l'importanza di alcuni parametri rispetto ad altri ma lasciando all'analista un ben calibrato spazio decisionale. Con quest'ottica, è chiaro che le possibili stringhe di pesi (**W**) possono essere tante quante le possibili permutazioni purché sia rispettata la sommatoria:

$$\sum_{i=1}^7 W_i = \text{costante} = 26 \quad (3-6)$$

con valore massimo del singolo moltiplicatore pari a 5.

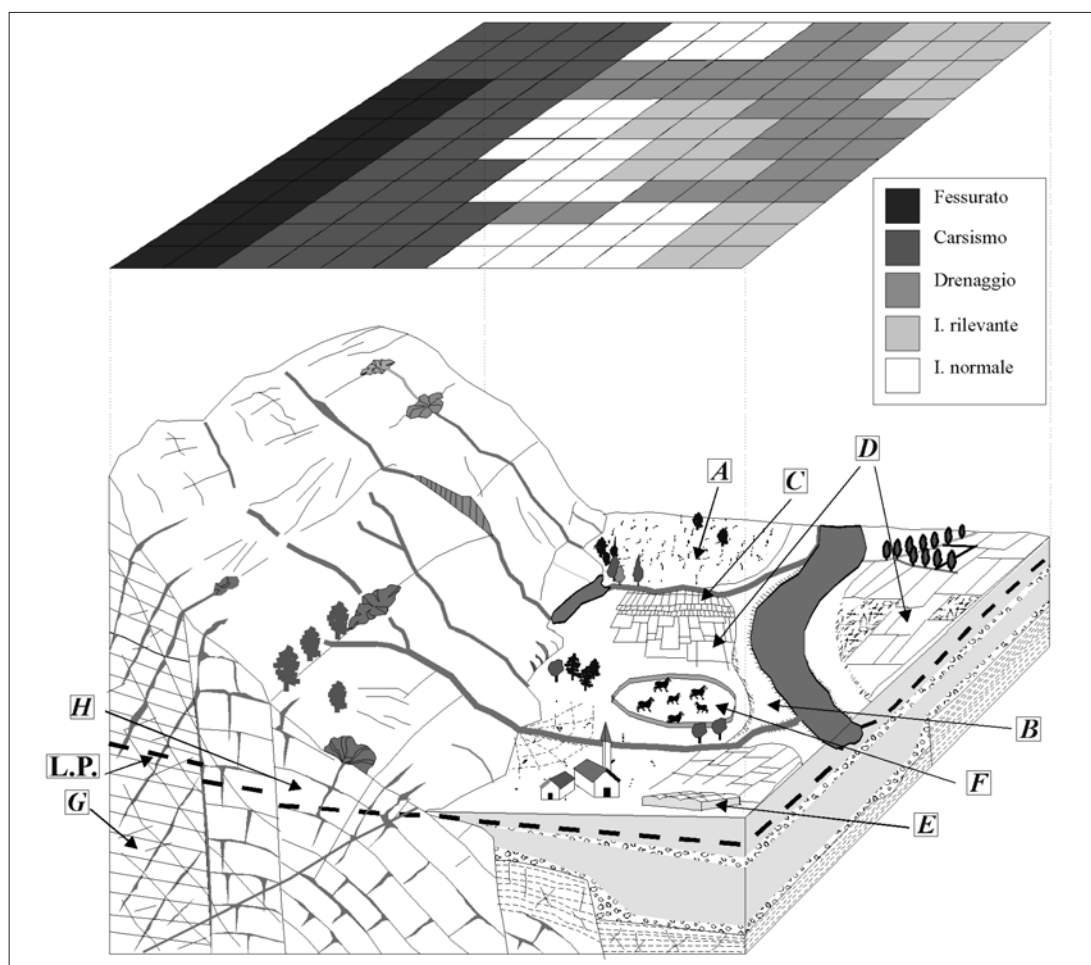
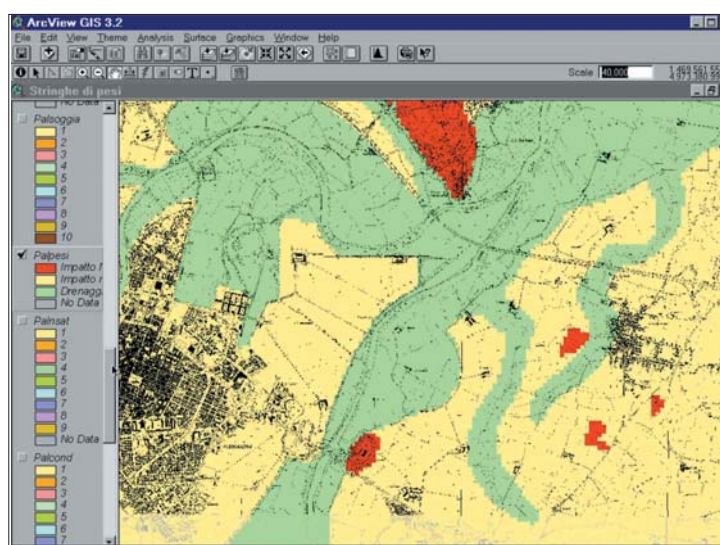


Figura 3.21 - Schema rappresentativo di un'area con situazioni idrogeologiche e di impatto diversificate e relative linee i pesi adottate per la valutazione della Vulnerabilità (A = Area incolta; B = Area golenale soggetta ad alluvionamenti; C = Irrigazione per sommersione; D = Colture con supporto chimico; E = Serre; F = Allevamenti; G = Acquiferi in rocce fessurate; H = Acquiferi in rocce carbonatiche)

L'utilizzatore del metodo può facilmente analizzare i singoli moltiplicatori delle varie stringhe e identificare le scelte che hanno portato a differenziare, più o meno, il peso dei singoli parametri nelle diverse situazioni descritte.

**Tabella 3.3 - Stringhe di pesi moltiplicatori previste per SINTACS (R5).**

Parametro	I. Normale	I. Rilevante	Drenaggio	Carsismo	Fessurato
S	5	5	4	2	3
I	4	5	4	5	3
N	5	4	4	1	3
T	3	5	2	3	4
A	3	3	5	5	4
C	3	2	5	5	5
S	3	2	2	5	4



**Figura 3.22 – Esempio di cartografia GIS delle stringhe di Pesì, area di Alessandria (da Regione Piemonte [2000]).**

### 3.1.8.2 Aree soggette a impatto normale

Riunisce tutte quelle situazioni, collegate in genere ad aree a scarso gradiente topografico (pianura, pedemonte, pianalto, conche intramontane, ecc.), con insaturo composto prevalentemente da rocce a permeabilità matriciale<sup>7</sup>, ove non sussistono particolari situazioni d'impatto antropico e con utilizzo reale del territorio contenuto e scarsamente trasformato. Si tratta di aree sterili, incolte o con colture spontanee o

che, comunque, non richiedono uso di fitofarmaci, concimi chimici, se non eccezionalmente e/o in dosi modeste, né pratiche irrigue. In tali aree è realizzato sovente l'allevamento brado, sia stagionale che stanziale. Mentre è evidente che un numero limitato di capi non comporta particolari impatti, si lascia alla discrezione dell'analista la scelta di attribuire a questi ambiti territoriali la classificazione *normale* oppure quella successivamente descritta (*impatti rilevanti*). Gli insediamenti, anche se limitati, non possono essere inclusi in questo tipo di scenario.

La stringa specifica esalta al massimo il peso relativo della soggiacenza e dell'insaturo, strettamente collegati all'effettiva penetrabilità del sistema da parte di un inquinante fluido. Valori bassi di soggiacenza, ricordiamolo, corrispondono a punteggi alti che vengono quintuplicati dallo specifico peso di stringa influenzando pesantemente sull'indice di vulnerabilità (cfr. 3.1.9). Analogamente, un insaturo capace di una forte azione di mitigazione darà un prodotto basso anche se il moltiplicatore è elevato mentre insaturi facilmente penetrabili incre-

<sup>7</sup> È evidente, come si vedrà nei successivi paragrafi che per sistemi idrogeologici in rocce fortemente incassate o fessurate, si dovranno utilizzare le stringhe appositamente progettate.

menteranno fortemente l'indice di vulnerabilità. Appena minore è l'enfasi attribuita, in queste condizioni, alla ricarica attiva, minore ancora risulta l'azione di prima barriera della copertura, considerando la buona azione di drenaggio esterno che caratterizza i suoli naturali indisturbati, ove presenti. Stessa importanza assumono il tipo d'acquifero, la sua conducibilità idraulica nonché l'acclività della superficie topografica.

### 3.1.8.3 Aree soggette a impatto rilevante

Questa linea di pesi serve a modellare situazioni territoriali che favoriscono impatti importanti da fonti diffuse d'inquinamento potenziale. Si tratta di territori, con insaturo costituito in prevalenza da mezzi a permeabilità matriciale, morfologicamente adatti ad antropizzazione estensiva, con colture che prevedono abbondanti trattamenti con fitofarmaci, concimi chimici, applicazioni di fert-irrigazione, spargimento di liquami; aree a discarica incontrollata, lagoni, vasche di dispersione, oleodotti, collettori fognari, ecc.; aree industriali attive e dismesse, aree urbanizzate e assimilabili.

In queste condizioni è evidente che il sottosistema insaturo giuoca un ruolo altamente preponderante, qualsiasi sia la tipologia dell'acquifero sottostante e la sua conducibilità idraulica. La stringa è stata, dunque, strutturata in modo da esaltare notevolmente la funzione della soggiacenza e dell'insaturo combinati, ma anche quella fondamentale del suolo come primo e potente baluardo contro l'inquinamento chimico e batteriologico idroveicolato da fonti sia diffuse che puntuali. Notevole enfasi viene tributata anche al parametro infiltrazione<sup>8</sup> per tenere conto delle pratiche irrigue che forniscono un potente vettore agli inquinanti sparsi o/e applicati sulla superficie del suolo; e delle perdite da strutture di accumulo o di condottamento di inquinanti (discariche, lagoni, serbatoi, sistemi fognari, oleodotti, etc.).

### 3.1.8.4 Aree soggette a drenaggio

Uno scenario particolare è stato identificato per quelle aree ove avviene un continuo o, comunque, frequente drenaggio da corpi idrici superficiali a quelli sotterranei sottostanti. Questa linea di pesi è stata calibrata fondamentalmente sulla forte riduzione se non sull'annullamento della soggiacenza in corrispondenza dei punti (o delle zone) nei quali può sussistere un collegamento tra acquifero e reticolo drenante superficiale, sia naturale che artificiale. Tali zone devono comprendere, oltre alle parti direttamente connesse al suddetto reticolo, le aree abitualmente esondabili dai corsi d'acqua in regime di piena e le aree soggette ad esondazione frequente<sup>9</sup>; le aree di irrigazione con grandi volumi d'acqua (irrigazione per sommersione e per scorrimento); le aree di affioramento continuo o periodico della superficie piezometrica libera (stagni, marcite, paludi). È evidente che le aree ove applicare la stringa in discussione devono essere accuratamente selezionate in funzione di indicazioni idrologiche presenti nei Piani di Bacino e nelle Carte dell'uso reale del territorio. In situazioni del tipo descritto, i parametri fondamentali che caratterizzano l'insaturo ed i processi che in esso avvengono sono meno esaltati dai moltiplicatori, mentre forte rilevanza viene attribuita al tipo di acquifero ed alla sua conducibilità idraulica. Ciò per esaltare l'importanza di tempi di transito veloci, l'alta capacità d'ingestione e di diluizione del corpo idrico sotterraneo. Il suo-

<sup>8</sup> Si ricorda che, in linea di massima, le aree urbanizzate devono essere considerate pressoché impermeabilizzate e, dunque, prive di infiltrazione diretta delle precipitazioni (ossia con c prossimo a 0). Tuttavia, si dovrà accertare con cura il sistema di smaltimento delle acque pluviali che hanno raccolto un notevole carico inquinante e le eventuali perdite dei sottoservizi urbani.

<sup>9</sup> Ci si riferisce alle aree esondabili codificate nelle "Linee guida per i Programmi nazionali, regionali e provinciali di previsione e prevenzione del rischio idrogeologico" (AA.VV. - P.Versace coord., in preparazione, Dipartimento Protezione Civile, Roma): alveo di piena ordinaria e fasce di rispetto delle piene golenali (fascia A); le fasce inondabili da una piena di riferimento (fascia B); le fasce inondabili dalle piene straordinarie (fascia C).

lo giuoca un ruolo secondario in questo scenario come pure l'acclività, per altro sempre molto limitata.

#### 3.1.8.5 Aree carsiche

Il quarto scenario selezionato è destinato a quelle zone ove sussistono condizioni di carsismo profondo e completo<sup>10</sup>. Si tratta di aree estesamente carsificate in superficie ed in profondità, con collegamenti rapidissimi tra superficie e acquifero attraverso punti di perdita dei dreni superficiali, pozzi carsici, inghiottitoi, ecc. Aree di questo tipo sono abbastanza diffuse nel territorio italiano, prevalentemente nelle zone alpine e prealpine (inclusendo in queste ultime il Carso triestino) ma anche in Appennino e nelle isole maggiori. È consigliabile applicare la relativa stringa anche alle aree a ruscellamento endoreico concentrico, tanto frequenti nei massicci carbonatici appenninici.

La stringa descrive tempi di transito (TOT) molto veloci: l'azione di mitigazione della soggiacenza combinata con l'insaturo è pressoché nulla poiché le acque superficiali si riversano nel sottosuolo percorrendo condotti anche molto profondi con velocità incomparabilmente maggiori di quelle che caratterizzano i processi infiltrativi normali. In queste situazioni, anche l'azione di attenuazione degli inquinanti prodotta, generalmente dal suolo, risulta quasi nulla. La massima enfasi viene attribuita, attraverso il valore dei moltiplicatori, all'infiltrazione efficace, che spesso corrisponde al totale delle precipitazioni efficaci ( $\chi \approx 1$ ); alle caratteristiche dell'acquifero ed alla sua permeabilità. Un elevato valore di moltiplicatore viene attribuito anche all'acclività, in modo da tenere nel massimo conto le zone assorbenti o perdenti a scarsa pendenza che favoriscono il ristagno se non l'allagamento temporaneo o continuativo<sup>11</sup>.

#### 3.1.8.6 Aree in rocce fessurate

Questa stringa deve essere applicata alle aree ove il sistema idrogeologico è costituito in prevalenza da rocce permeabili per fessurazione, non carsificate o con carsismo sviluppato solo in superficie, in assenza, quindi, di condotti e pozzi collegati direttamente ad un sistema di cavità evoluto. In questo tipo di scenario il ruscellamento superficiale può essere scarso in assenza di suolo. I tempi di transito, anche se rilevanti nei primi metri di insaturo, si abbassano e si uniformano in profondità in funzione della conducibilità idraulica dell'insaturo prima e poi del saturo.

Per tanto, il massimo moltiplicatore della stringa in oggetto è quello relativo al parametro **C**, seguito da quello relativo al tipo di acquifero. Lo stesso valore attribuito a quest'ultimo moltiplicatore viene assegnato al suolo, se presente, ed all'acclività della superficie, data la notevole influenza di questi due parametri combinati sulla capacità di ingestione del sistema. Un peso minore è attribuito a parametri come la soggiacenza, l'infiltrazione e l'insaturo (in quanto tale) a testimonianza di un'azione di mitigazione globale dell'intero sistema e non strettamente connessa con i singoli parametri citati.

#### 3.1.9 L'indice di vulnerabilità

Per ciascun elemento di maglia della griglia che discretizza l'area d'interesse si calcolano i pesi relativi ai 7 parametri del metodo, si identifica una delle cinque situazioni-scenario descritte

<sup>10</sup> Ci si riferisce a situazioni di holokarst riportabili a modelli concettuali di sistemi con rete a primario dominante (Civita et al., 1991).

<sup>11</sup> In molte conche endoreiche presenti nelle strutture carbonatiche si formano laghi o paludi stagionali o perenni alimentate dalle acque di ruscellamento (che vi trascinano grandi quantità di inquinanti) quando la capacità di ingestione delle perdite carsiche non è tale da eguagliare i volumi corrivati. Spesso ai punti di perdita e/o gli inghiottitoi che esauriscono tali conche vengono portati scarichi civili e industriali altamente inquinanti.



te e si assume la *stringa* relativa. In teoria, le situazioni descrivibili operando sui pesi sono moltissime, il che aumenta la duttilità del metodo nei confronti di altri PCSM. In pratica, le molte altre combinazioni sin qui testate non hanno dato, alla prova dei fatti, una descrizione soddisfacente delle situazioni complesse che si voleva rappresentare.

In tutti i casi e per ciascun elemento di maglia, l'indice di vulnerabilità intrinseca ( $I_{SINTACS}$ ) si ottiene:

$$I_{SINTACS} = \sum_{i=1}^7 P_i W_i \quad (3-7)$$

essendo **P** il punteggio di ciascuno dei 7 parametri considerati dal metodo e **W** il peso relativo della stringa prescelta.

L'integrazione dei valori così ottenuti fornisce, per ogni maglia, un valore numerico rappresentante la vulnerabilità intrinseca dell'acquifero di riferimento. Tali valori possono variare da un minimo di 26 ad un massimo di 260 punti.

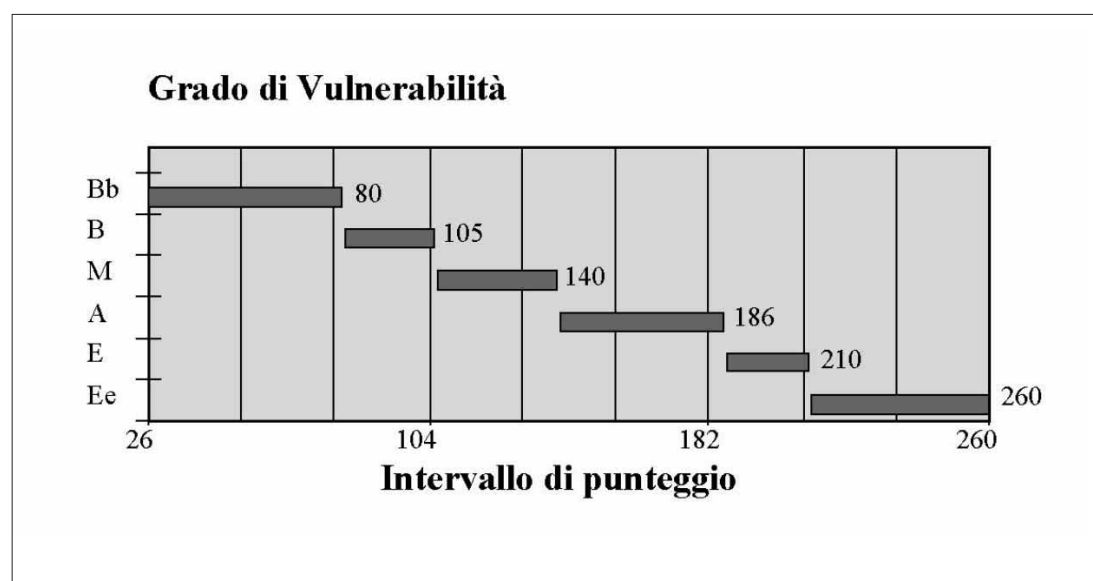
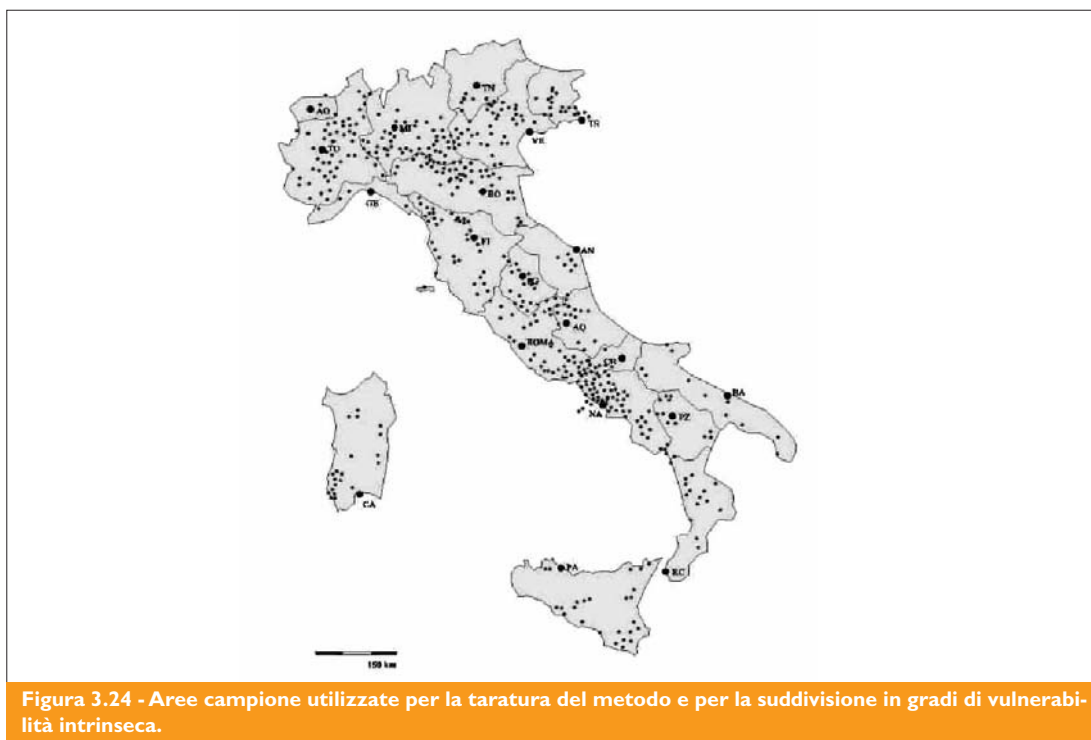


Figura 3.23 - Intervalli/gradi di vulnerabilità intrinseca (punteggi grezzi).

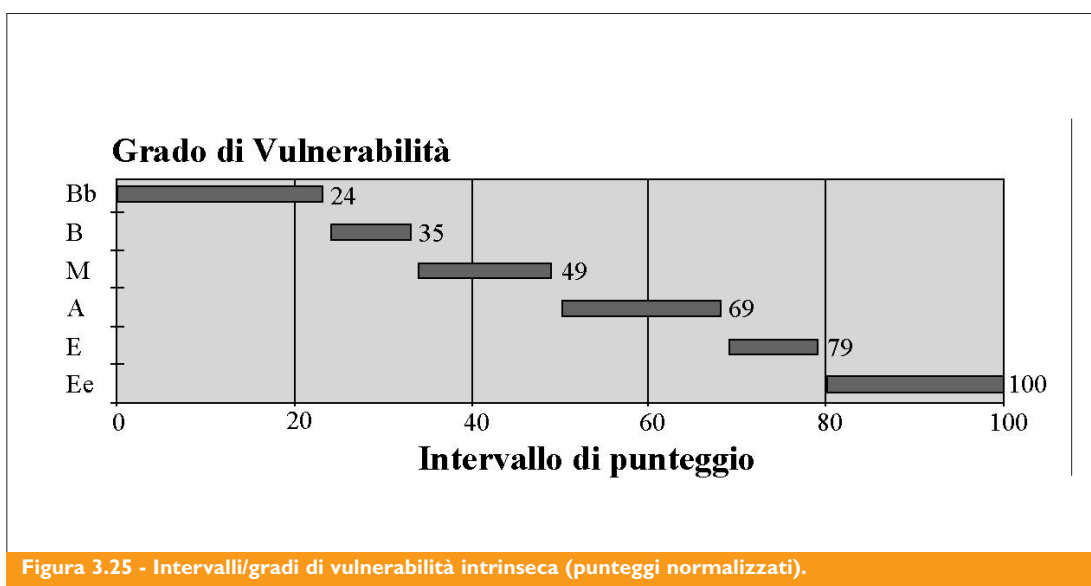
Il problema di suddividere l'intero intervallo di valori dell'indice in gradi di vulnerabilità intrinseca, in modo da poterli rappresentare cartograficamente in una forma comprensibile a tutti e che permetta una valutazione comparativa standardizzata tra zone diverse, non era di facile soluzione. Nel quadro della ricerca che ha portato all'attuale livello il metodo SINTACS, è stata adottata la seguente soluzione. Sono stati raccolti i dati di campagna necessari e sufficienti a caratterizzare i 7 parametri di base in oltre 600 siti - campione opportunamente selezionati in tutte le principali aree italiane considerate ad elevato rischio nell'ambito del Progetto Speciale VAZAR<sup>12</sup> (fig. 3.24).

<sup>12</sup> Si tratta del Progetto di ricerca più importante tra quelli sviluppati dalla Linea 4 del GNDICI-CNR relativa alla valutazione della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento, in corso con rilevanti risultati in quasi tutte le regioni italiane sin dal 1985.





Per ciascun sito, è stata fatta una doppia valutazione del grado di vulnerabilità abbinando il Metodo-base GNDICI-CNR<sup>13</sup> e SINTACS. I risultati ottenuti sono stati trattati statisticamente ottenendo, per i 6 gradi di vulnerabilità previsti dal citato Metodo-base altrettanti intervalli definiti dell'Indice SINTACS tal quale ( $IS_{GR}$ ) (fig. 3.23).



<sup>13</sup> Il Metodo-base GNDICI-CNR è stato usato per la redazione di moltissime cartografie della vulnerabilità degli acquiferi in Italia. Esso è descritto ampiamente in Civita (1990.b) e completamente in Civita (1994).

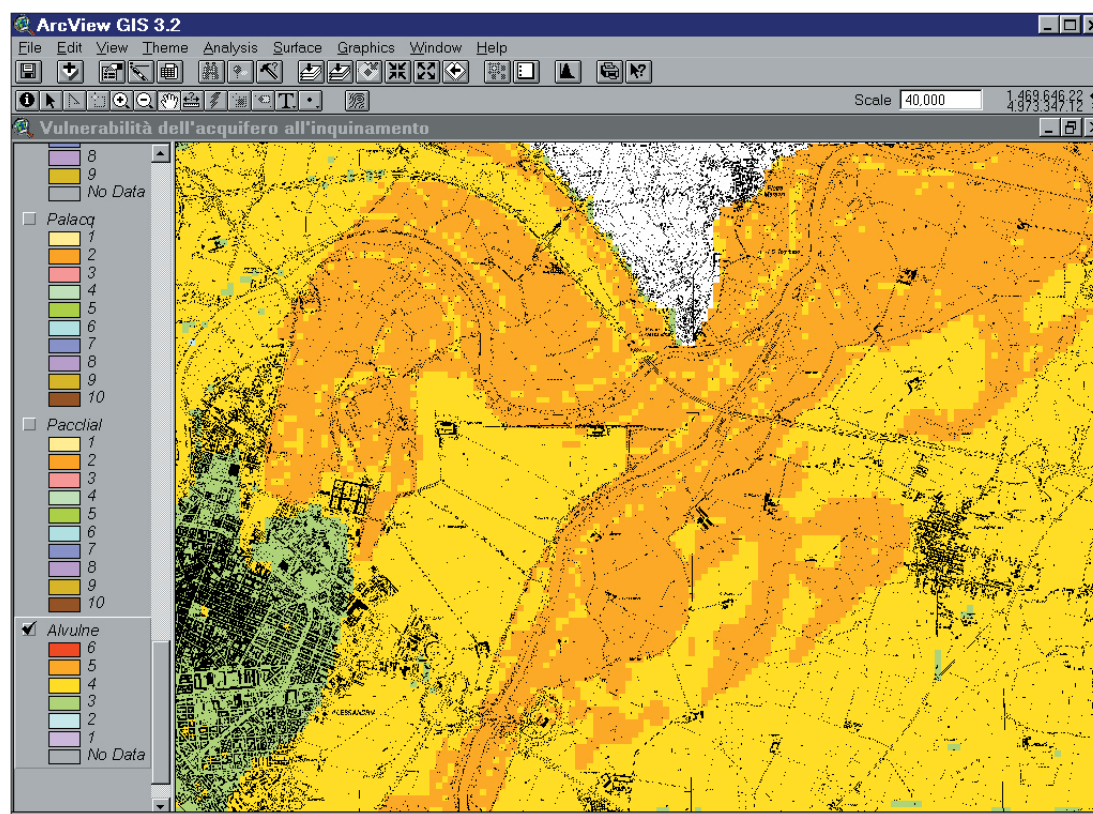


Figura 3.26 – Esempio di Carta di vulnerabilità realizzata con strumenti GIS, area di Alessandria, (da Regione Piemonte [2000]).

I valori grezzi dell'Indice sono, poi, stati normalizzati (espressi in percentuale) per semplicità di lettura (fig. 3.25) mediante l'espressione:

$$IS_{NO} = \frac{IS_{GR} - IS_{MIN}}{IS_{MAX} - IS_{MIN}} \cdot 100 \quad (3-8)$$

in cui  $IS_{NO}$  è l'Indice normalizzato mentre  $IS_{MAX}$  e  $IS_{MIN}$  sono, rispettivamente, i valori massimo e minimo dell'Indice SINTACS grezzo, ossia 260 e 26.

### 3.2 Metodo base gndci

#### 3.2.1 Parametri di ingresso

Questo metodo [Civita M., in: AA.VV. (1988); Civita M. (1990.b)] non richiede alcun parametro d'ingresso specifico di tipo numerico.

Viene fornito un protocollo ove viene riportato un buon numero di situazioni idrogeologiche collegate ai complessi idrogeologici presenti nell'ambito idrogeologico del territorio italiano in particolare ma, in generale, nella maggior parte dei casi (figg. 3.27a, 3.27b).

Viene, dunque suggerito di identificare la situazione idrogeologica d'interesse tra quelle elencate, ognuna accoppiata con la relativa valutazione del grado di vulnerabilità intrinseca. Il me-

todo è molto flessibile e può essere, all'occorrenza, adattato a quelle situazioni specifiche non elencate nel protocollo metodologico.

### 3.2.2 *Elaborazione*

Questo tipo di metodologia utilizza un certo numero di indici litologici, strutturali, piezometrici e idrodinamici non rigorosamente quantizzati che identificano situazioni diverse.

Per il confronto diretto sono state previste e catalogate circa venti situazioni idrogeologiche differenti. Tali situazioni fanno diretto riferimento alla geometria degli acquiferi, al litotipo e alle caratteristiche di porosità e di permeabilità primaria o secondaria dei litotipi interessati.

L'elaborazione delle situazioni è partita con un esame generale delle situazioni geologiche ed idrogeologiche italiane, sulla base delle cartografie esistente e delle descrizioni disponibili. Da questa prima selezione sono state identificate quelle situazioni che meglio rappresentano un intorno idrogeologico ben definito (per es. le condizioni idrogeologiche della Pianura Padana, i massicci carbonatici, le situazioni carbonatiche pugliesi e del Carso triestino, il vulcanico delle regioni centromeridionali, ecc.). Per ciascuna situazione – tipo, sono stati identificati i principali fattori che influenzano la vulnerabilità degli acquiferi (per es., la soggiacenza, le caratteristiche di porosità, fratturazione e carsificazione, la posizione del livello piezometrico rispetto ai corsi d'acqua, ecc.). In fine, usando un principio di comparazione già alla base di precedenti esperienze (Albinet & Margat, 1970), sono state attribuite le diverse situazioni a 6 diversi gradi di vulnerabilità intrinseca, tenendo conto della dinamica di casi di inquinamento noti e della frequenza relativa degli stessi.

### 3.2.3 *Prodotto finale e presentazione*

Le situazioni idrogeologiche selezionate, contrassegnate da colorazioni o tratteggi standard, sono immesse in uno schema di legenda a 6 colonne, ciascuna relativa ad uno dei gradi di vulnerabilità (intrinseca) previsti. Ciò rende la legenda sinottica e direttamente interpretativa, utilizzabile, quindi sia in fase di redazione della Carta, sia per la sua interpretazione e lettura. Sono prestabilite, inoltre, numerose simbologie sovrapponibili alla cartografia della vulnerabilità intrinseca, in modo da completarla e trasformarla in una Carta della vulnerabilità integrata. Queste sono relative:

- alla geometria e idrodinamica dei corpi idrici sotterranei;
- allo stato di inquinamento degli acquiferi;
- ai produttori reali e potenziali di inquinamento (CDP);
- ai potenziali ingestori e viacoli di inquinamento;
- ai preventori e/o riduttori di inquinamento;
- ai principali soggetti a inquinamento.

Con tali sovrapposizioni, le Carte diventano un vero strumento di piano e possono essere adoperate facilmente in chiave di previsione e prevenzione degli inquinamenti. Il metodo è stato indicato come uno dei riferimenti per la realizzazione delle cartografie del Programma Speciale VAZAR del GNDICI-CNR e diffusamente applicato a varie scale nelle numerose aree - campione sparse in tutto il territorio nazionale. E' stato, inoltre, recentemente indicato come uno degli standard negli allegati tecnici del D.Lgs. 152/99.

### 3.2.4 Analisi critica del metodo

Il metodo è stato predisposto per una copertura globale a scala operativa (1:50000) dell'intero territorio nazionale italiano, tenendo conto di tutti i suoi mutevoli aspetti morfologici, idrogeologici e di impatto potenziale. Tiene in conto, pragmaticamente, il grado di copertura dei dati idrogeologici, il loro numero e la loro qualità, molto diversi nelle diverse zone del Paese.

Nonostante il buon numero di situazioni idrogeologiche previste, anche per questo metodo, come per tutti i metodi di questo tipo, si possono riscontrare spesso condizioni che non rientrano tra quelle previste o che richiedono un ulteriore e più profondo livello di discriminazione. Era, per tanto, insito nella relativa semplicità e duttilità della metodologia la possibilità di aggiustamenti strutturali e non strutturali, sia di adattamento contingente, sia di miglioramento sostanziale.

Pertanto, rimandando alle diverse cartografie realizzate, alle note illustrative ed agli articoli specialistici che illustrano le singole esperienze di ricerca, sembra qui il caso di ricordare i più importanti adattamenti e miglioramenti proposti.

Quasi tutte le cartografie effettuate in territori accidentati hanno fornito un contributo in termini di numerose diversificazioni di situazioni idrogeologiche e d'impatto, in funzione del dettaglio (si veda per es. Ferrara, 1990; Martini & Marchetti, 1990) con interessanti proposte e soluzioni per quelle cartografie che devono affrontare il problema di più acquiferi sovrapposti e più o meno inteconnessi (si veda per es. Aureli *et al.*, 1993); con nuovi simboli per le attività antropiche previste e non previste dalla legenda originale (quasi tutti).

Diversi autori, in particolare quelli che hanno prodotto cartografie di dettaglio (1:25.000 - 1:10.000) hanno introdotto, nella metodologia e nella legenda, la *soggiacenza* (Ferrara, 1990; Antonelli & Mari, 1993) o lo *spessore dell'insaturo* (Benacchio *et al.*, 1988) o, ancora, le *isopache del tetto dell'acquifero* (p.e. si veda Zavatti *et al.*, 1989) come discriminante in ambiente di pianura alluvionale. In alcuni casi, sono state rappresentate le condizioni del rapporto tra acque superficiali e acquifero la geometria e idrodinamica dei corpi idrici sotterranei.

Nelle figure 3.27a e 3.27b è riportata la metodologia/legenda, ossia le linee-guida del Metodo-Base GNDICI-CNR. I colori servono ad uniformare la cartografia in modo che Carte contigue possano essere facilmente confrontate. I singoli rettangoli contenenti i colori (o la retinatura a colori) sono incolonnati in modo da corrispondere alla valutazione della vulnerabilità secondo i noti 6 diversi livelli (**EE** = Estremamente elevata; **E** = Elevata; **A** = Alta; **M** = Media; **B** = Bassa; **BB** = Bassissima) già utilizzati per la cartografia di SINTACS. Ciò rende agevole, dove viene applicato, utilizzare l'Approccio Combinato che viene trattato nel paragrafo seguente.







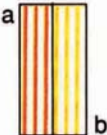
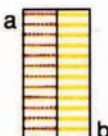


<div>E<sub>E</sub></div> <div>E</div> <div>A</div> <div>M</div> <div>B</div> <div>B<sub>B</sub></div>	CARATTERISTICHE DEGLI ACQUIFERI
	Falda libera in materiali alluvionali (da grossolani a medi) senza alcuna protezione.
	Falda libera in materiali alluvionali con: a) corsi d'acqua sospesi rispetto alla piezometrica media della falda (alimentazione naturale); b) campi-pozzi deprimenti la piezometrica al di sotto del livello dei corsi d'acqua (realimentazione indotta).
	Falda o rete acquifera, in pressione, semi-libera o libera, protetta in superficie da una copertura poco permeabile.
	Rete acquifera in materiali carbonatici a carsismo completo ed altamente sviluppato (holokarst ad elevato i.c.).
	Rete acquifera in calcari fessurati, ma con i.c. basso o nullo; a) con piezometrica media poco profonda (< 50 m) rispetto al p.c.; b) con piezometrica media profonda (> 50 m) rispetto al p.c.
	Rete acquifera in dolomie fessurate e poco carsificate; a) con piezometrica media poco profonda (< 50 m) rispetto al p.c.; b) con piezometrica media profonda (> 50 m) rispetto al p.c.
	Falda acquifera in sabbie più o meno fini.
	Rete acquifera in arenarie più o meno fessurate ed in conglomerati a cemento non carbonatico.

Figura 3.27 a – Protocollo per la effettuazione della valutazione della vulnerabilità intrinseca degli acquiferi all'inquinamento con il Metodo – base GNDICI-CNR [Prima Parte] (Fonte: Civita, 1990)



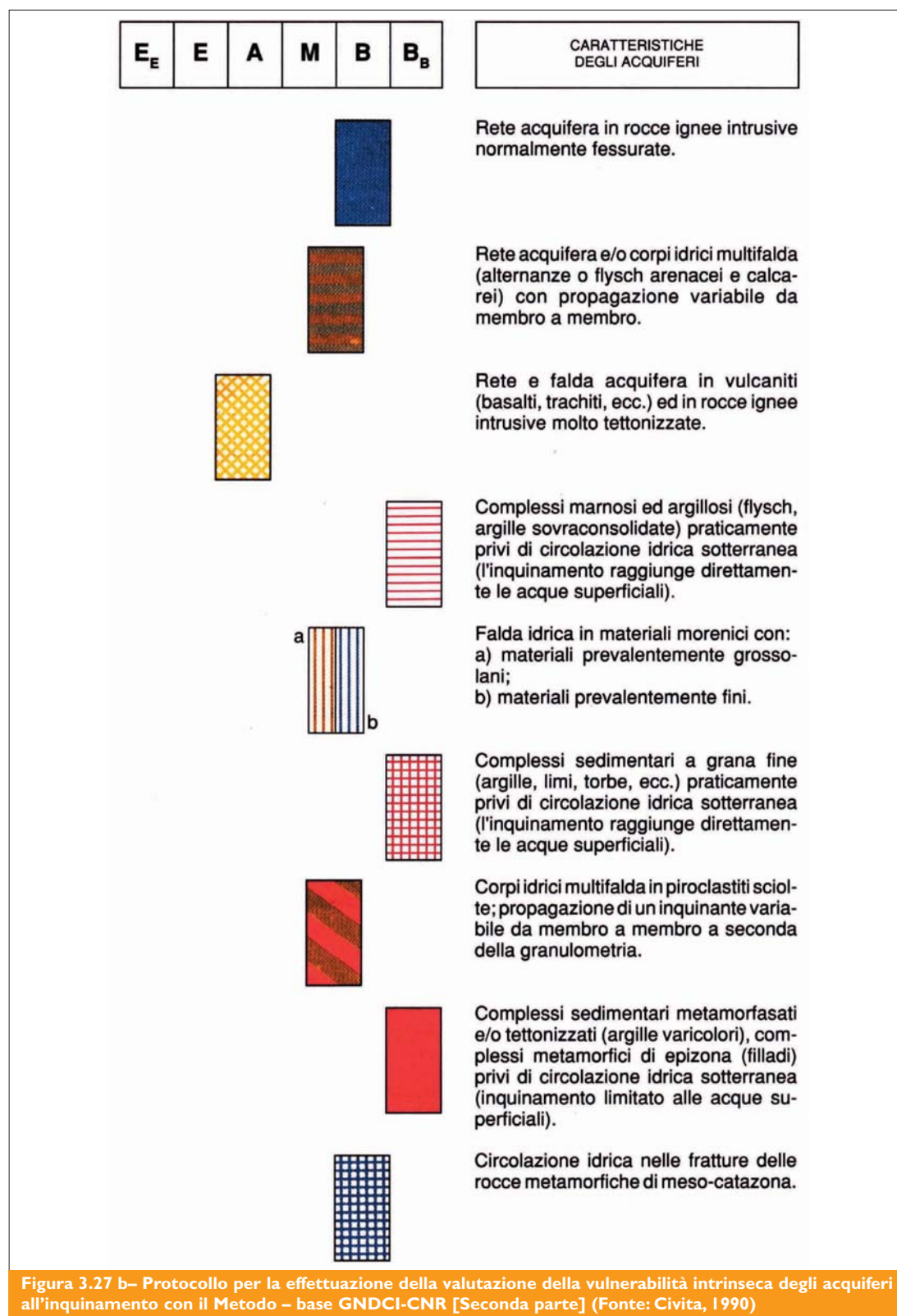


Figura 3.27 b– Protocollo per la effettuazione della valutazione della vulnerabilità intrinseca degli acquiferi all'inquinamento con il Metodo – base GNDICI-CNR [Seconda parte] (Fonte: Civita, 1990)

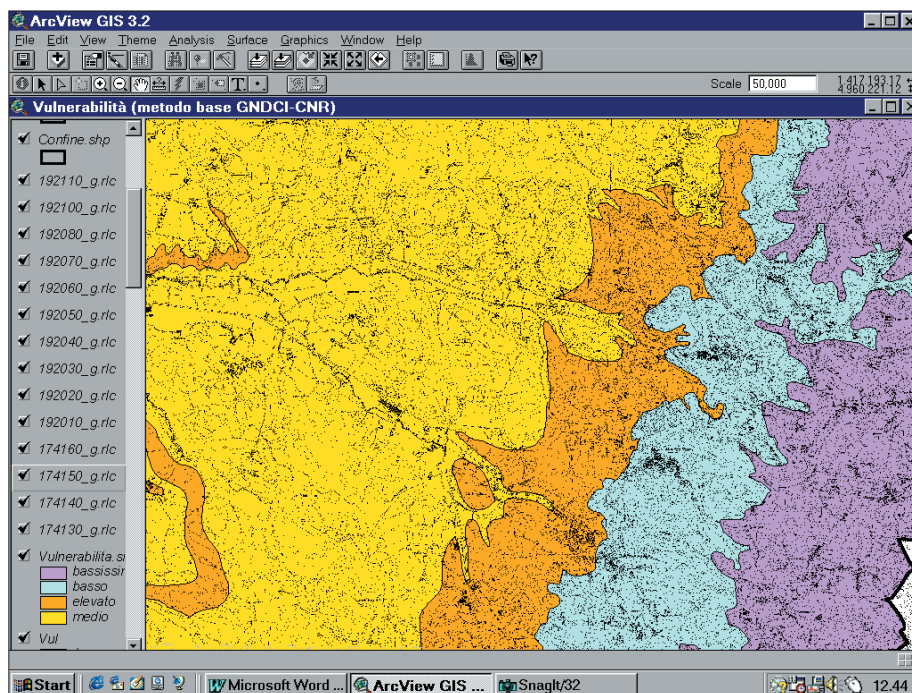


Figura 3.28 – Esempio di Carta della Vulnerabilità, metodo base GNDCI-CNR, realizzata con strumenti GIS, area del Braidese.

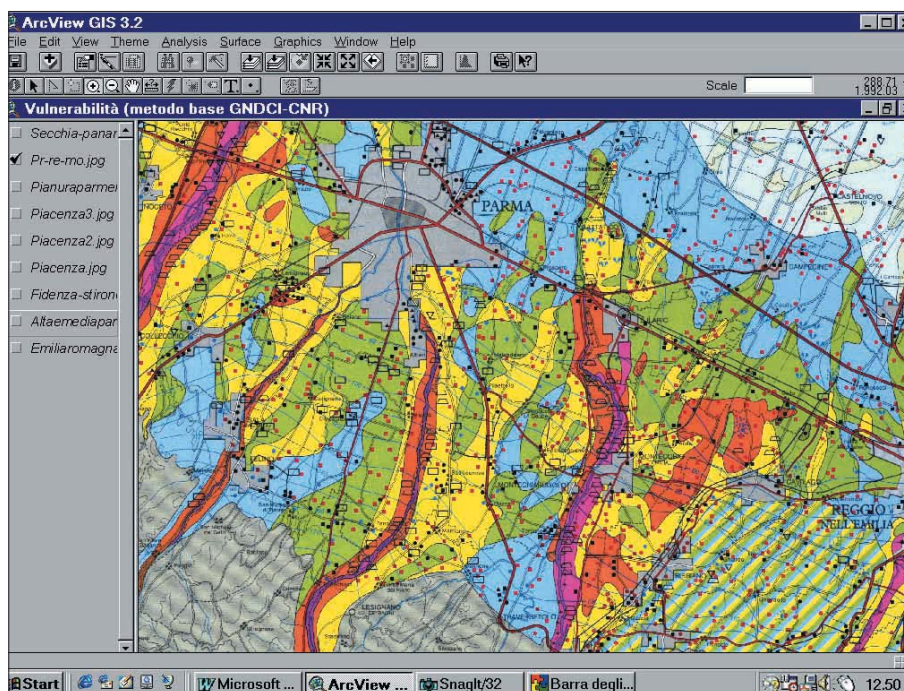


Figura 3.29 - Carta della Vulnerabilità degli acquiferi (integrata) – Metodo base GNDCI-CNR. – Area di Parma, da: Zavatti et al. [1993]



### 3.3 Metodologia d'approccio combinato

#### 3.3.1 L'approccio combinato

Da quanto si è visto nel Capitolo 2, in molte zone ove è necessario coprire con Carta della vulnerabilità vaste aree identificate da limiti amministrativi (per es. Comuni, Province, Regioni) o fisiografici (bacini interregionali), i modelli parametrici evoluti non sono applicabili per insufficienza di dati laddove si esce da una morfologia pianeggiante e si passa ad aree collinari e montuose. In tali situazioni, s'è scelto in passato una metodologia semplice, capace di una valutazione meno raffinata e dettagliata ma, comunque, applicabile con buoni risultati per molti problemi territoriali e ambientali legati all'inquinamento degli acquiferi.

L'esperienza degli ultimi anni ha, però, portato ad una riconsiderazione del problema metodologico: perché rinunciare al dettaglio offerto dai modelli parametrici a punteggi e pesi (Civita, 1990, 1994) nelle aree a moderato rilievo, dove sono concentrati la maggioranza dei CDP e delle FDP nonché buona parte delle fonti d'approvvigionamento (ossia i *soggetti a rischio* – SAR) ? Come, d'altra parte, effettuare le valutazioni di vulnerabilità e di rischio d'inquinamento per aree a forti soggiacenze e, quindi, descrivibili con dettaglio minore in base ai *complessi ed alle situazioni idrogeologiche*?

La soluzione trovata e testata è l'*approccio combinato* che consiste nel combinare, appunto, il Metodo – Base GNDCI-CNR con il PCSM SINTACS senza soluzioni di continuità, il secondo nelle aree ove sussistono i dati necessari e sufficienti all'applicazione del modello parametrico; il primo, nelle zone, ove le forti soggiacenze, la complessità idrolitologica e idrostrutturale e la mancanza di dati certi su suoli, conducibilità idraulica e ricarica attiva non permettono un dettaglio paragonabile a quello che si ottiene utilizzando SINTACS.

Il necessario collegamento, sia concettuale, sia cartografico, tra zone adiacenti ove si devono applicare metodologie diverse, è fornito dalle valutazioni parametriche. In pratica, per quei complessi ove sussiste già una valutazione parametrica, si applicano gli stessi gradi di vulnerabilità, tenuto conto, però, delle mutate condizioni d'acclività e di soggiacenza. Tutto ciò è reso possibile dal fatto che la calibrazione di SINTACS è stata effettuata confrontando, come si è detto, la valutazione SINTACS con quella effettuata con il Metodo – Base GNDCI-CNR, su oltre 600 *test-sites* distribuiti in tutte le aree ed i territori italiani. L'esplicitazione dell'indice numerico in 6 gradi di vulnerabilità,

gli stessi del Metodo – Base, rende confrontabili i due metodi e ottimamente combinabili i risultati.

L'applicazione dell'approccio combinato ha dato ottimi risultati nell'area del Progetto Tanaro (Regione Piemonte, 2000), consentendo una copertura completa senza perdita d'informazione di base e di accuratezza di sintesi. Nelle Figg. 3.30 e 3.31 sono riportati altrettanti esempi di cartografia della vulnerabilità effettuati con l'Approccio Combinato dei due metodi. Nelle figure, la linea nera spessa rappresenta la linea di demarcazione tra le aree trattate con i due diversi metodi. Si noti, dunque, l'omogeneizzazione che l'approccio comporta.

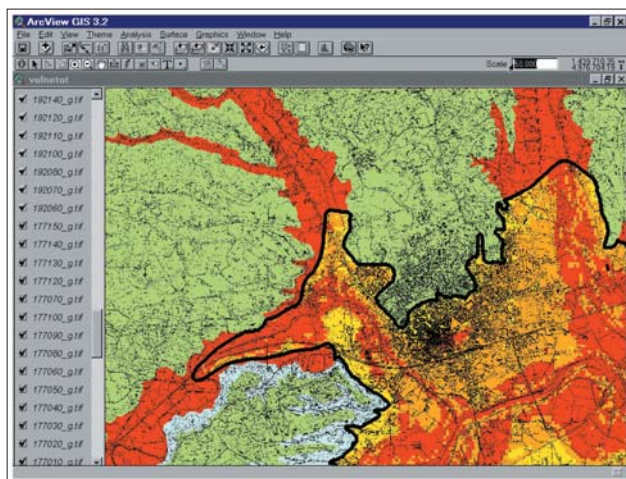


Figura 3.30 – Carta della Vulnerabilità degli acquiferi, approccio combinato realizzata con strumenti GIS, area di Alessandria (da Regione Piemonte [2000]).

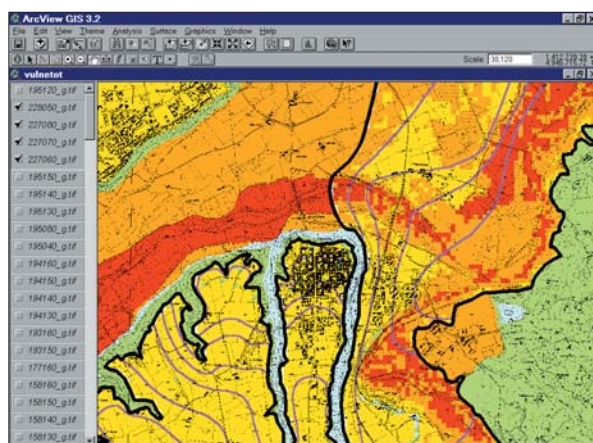


Figura 3.31 - Carta della Vulnerabilità degli acquiferi, approccio combinato realizzata con strumenti GIS, (da Regione Piemonte [2000]).

### 3.4 Il censimento delle attività impattanti e dei soggetti a rischio

La copertura globale di un determinato territorio con le informazioni necessarie e sufficienti a redigere una cartografia integrata della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento presenta notevoli difficoltà e tempi di solito alquanto lunghi. Non essendo disponibile quasi mai un database già predisposto, è necessario organizzare e svolgere il censimento con squadre di rilevatori, tanto più numerose quanto più vasta è l'area d'indagine.

I dati da raccogliere e classificare devono essere accuratamente georeferenziati. Le informazioni sono rese omogenee

per classi, utilizzando schede - questionario opportunamente predisposte.

Le classi d'informazioni necessarie sono, in sintesi, le seguenti:

- fattori di pressione antropica, comprendenti sia i centri di pericolo (CDP), sia le fonti diffuse di pericolo (FDP), sia i potenziali ingestori e viacoli d'inquinamento, ossia quegli elementi propri dell'antropizzazione (Cave, pozzi abbandonati) ed i fenomeni naturali, quali quelli carsici, che favoriscono l'ingresso degli inquinanti nel sottosuolo;
- i preventori/riduttori d'inquinamento, comprendenti tutte le opere e gli interventi tesi a ridurre il potenziale d'impatto sul suolo, sulle acque superficiali e su quelle sotterranee;
- i soggetti a rischio, prevalentemente le opere di captazione delle risorse idriche sotterranee (RIS), comprese le aree di salvaguardia delle stesse e le porzioni d'acquifero particolarmente vulnerabili per soggiacenza scarsa o nulla (stagni, marcite, paludi, ecc.);
- la geometria e l'idrodinamica dei corpi acquiferi, rappresentate in genere attraverso l'elaborazione del campo di moto (per es. carta a curve isopiezometriche, con direzioni di flusso, spartiacque sotterranei, ecc.).

È consigliabile procedere per fasi.

Nella prima fase, la ricerca viene effettuata presso gli Enti Pubblici di ogni ordine, preposti allo sviluppo ed alla tutela dell'ambiente e delle sue risorse.

Gran parte delle attività industriali sono riportate nei Piani Regolatori, nei Piani di Risana-mento, nei Repertori e nelle molte pubblicazioni delle Camere di Commercio, nei censimen- ti e nelle indagini periodicamente effettuate e pubblicate dall'ISTAT, sia come Censimenti, An- nuari e Monografie, sia sotto forma di Atlanti (per es. l'Atlante Statistico italiano, 1988), ecc. L'ISTAT ha effettuato il 7° Censimento generale dell'Industria e dei Servizi che comprende ri- chieste di informazioni specifiche di carattere ambientale alle industrie con almeno 10 addet- ti. Pertanto, si potranno utilizzare informazioni aggiornate sui prelievi idrici; scarichi, riciclaggio e depurazione delle acque; consumi energetici e controllo delle emissioni gassose nell'atmo- sfera, ecc.

Inoltre, notizie importanti sono reperibili presso le ARPA, gli Assessorati regionali e provin- ciali, in particolare presso questi ultimi per quel che riguarda il censimento degli scarichi liquidi e solidi.

Associazioni ambientaliste e del volontariato (solo quelle riconosciute e finanziate dal Mini-

stero dell'Ambiente sono 17) hanno, inoltre, compiuto censimento di attività potenzialmente inquinanti, quali le discariche non controllate, censimenti spesso utili per la segnalazione e l'ubicazione di questi centri di pericolo.

Dati sulle cave e sulle attività minerarie sono reperibili presso gli Assessorati regionali, presso gli Uffici Minerari ed i Servizi Geologici.

Molto più difficile è il reperimento e l'ubicazione delle fonti potenziali di inquinamento non-puntuale. Le attività agricole, in molti casi ed in molte zone, sono variabili di anno in anno. Di conseguenza mutano i quantitativi, le tipologie ed i metodi di applicazione di concimi e fitofarmaci. I dati su tali attività sono reperibili presso gli Enti di Sviluppo Agricolo, presso i Consorzi agrari e dalla consultazione, ove esistono, dei Progetti di Piano Agricolo Zonale. Un metodo sistematico di valutazione del pericolo potenziale d'inquinamento da parte delle attività agricole è stato di recente messo a punto e testato nel quadro degli studi della Linea 4 del GNDCI-CNR (Trevisan, Padovani & Capri, 2000). La metodologia è basata, piuttosto che sui tipi di coltura (variabili), sul tipo di uso agricolo e sulle pratiche che l'accompagnano, sul tipo di irrigazione, sul clima. Sovrapponendo la classificazione derivante dall'applicazione della metodologia alla valutazione parametrica SINTACS si ottengono ottimi risultati in termini di previsione del rischio di inquinamento potenziale. Analoghe difficoltà si registrano, in Italia, per ottenere ubicazione e consistenza degli allevamenti zootecnici. Data la notevole diversità, sia delle tecniche di allevamento, sia del tipo e dei quantitativi di deiezioni, è buona norma suddividere gli allevamenti in funzione della tipologia del bestiame e della relativa consistenza in capi. E', in tal modo, possibile calcolare la quantità di nitrati prodotta all'anno per ciascun capo adulto di peso medio e, per sommatoria, la quantità totale per area totale e/o per area elementare.

L'ISTAT, oltre alle sue numerose pubblicazioni in tema di aziende agricole e zootecniche, sta per produrre informazioni e cartografie normali (a colori) e di tipo numerico su supporto magnetico dei censimenti al 2000 delle attività industriali e dei servizi; e delle aziende agricole e zootecniche. Sono, inoltre disponibili per l'interrogazione diverse banche-dati ISTAT dalle quali ottenere informazioni, continuamente aggiornate su:

- Industria e Commercio;
- Artigianato;
- Agricoltura e allevamenti;
- Fonti d'informazione ambientale.

Dal 1988 è in via di realizzazione il Sistema Informativo Nazionale per l'Ambiente (SINA) del Ministero dell'Ambiente.

Le attività antropiche non sono solo produttrici di inquinamento. Esiste tutta una gamma di azioni strutturali che l'Uomo ha sviluppato sin da quando, formandosi i primi estesi agglomerati urbani, esso ha cominciato a percepire la relazione di causa-effetto tra contaminazione e danni alla salute. Le reti fognarie e le forniture d'acqua corrente sono state tra le prime azioni d'allontanamento degli inquinanti dall'ambiente urbano, anche se, è ovvio, allontanamento non significa eliminazione dell'inquinante dall'ambiente ma solo trasferimento del problema in termini territoriali e temporali.

Un controllo efficace delle fonti inquinanti si ottiene solo quando i rifiuti liquidi e solidi prodotti dall'attività dell'uomo non sono soltanto spostati a distanza più o meno ragionevole dagli insediamenti ma vengano, di fatto, trattati sino ad abbattere il loro potenziale d'impatto sull'ambiente, in genere, e sulle acque sotterranee, in particolare. Nelle zone ove esistono funzionali e funzionanti impianti per il trattamento dei rifiuti (discariche controllate, centri di trattamento dei rifiuti, impianti di depurazione) non v'è dubbio che il potenziale d'impatto venga, di fatto, abbattuto e che la salvaguardia della qualità



delle acque soggiacenti sia molto più efficace di quanto si rileva in zone sprovviste di tali infrastrutture. La mancanza di queste, inoltre, comporta inevitabilmente scarichi incontrollati d'ogni genere sino a degenerare nella proliferazione di scarichi abusivi di enorme pericolosità.

La funzione preventiva delle strutture ed infrastrutture di cui trattasi appare viepiù evidente quando, a causa di eventi calamitosi a forte impatto territoriale (sismi, eruzioni, inondazioni, frane), tali opere vengono distrutte o messe temporaneamente fuori uso, sicché tutto il carico ambientale da esse trattenuto si riversa di nuovo e in forma concentrata nel territorio, aggiungendo un nuovo disastro a quello indotto direttamente dalle catastrofi. Censimenti e rilievi sono stati fatti di recente anche a cura dei Vigili del Fuoco, della Protezione Civile, e della Guardia Forestale.

E', quindi, evidente la necessità di riportare nelle Carte di vulnerabilità con opportuni simboli (vedi Legenda unificata nelle pagine seguenti) tutte le infrastrutture destinate a prevenire e a ridurre l'inquinamento, sia per mettere in condizione l'utilizzatore delle Carte di conoscerne ubicazione e potenzialità, sia per poter disporre di opportuni controlli di efficienza di impianti che, se mal costruiti o mal gestiti, possono trasformarsi in vere bombe a tempo in termini d'impatto ambientale.

I dati relativi a questi fattori antropici si devono ricercare presso le Amministrazioni comunali, provinciali e regionali, sono riportati nei Piani di Risanamento delle Acque e nei Piani Regolatori. L'ISTAT ha pubblicato un'indagine sulla consistenza degli impianti di depurazione e su quelli di trattamento dei rifiuti solidi. Altri dati sono stati pubblicati a cura del FORMEZ per quanto attiene al Mezzogiorno d'Italia.

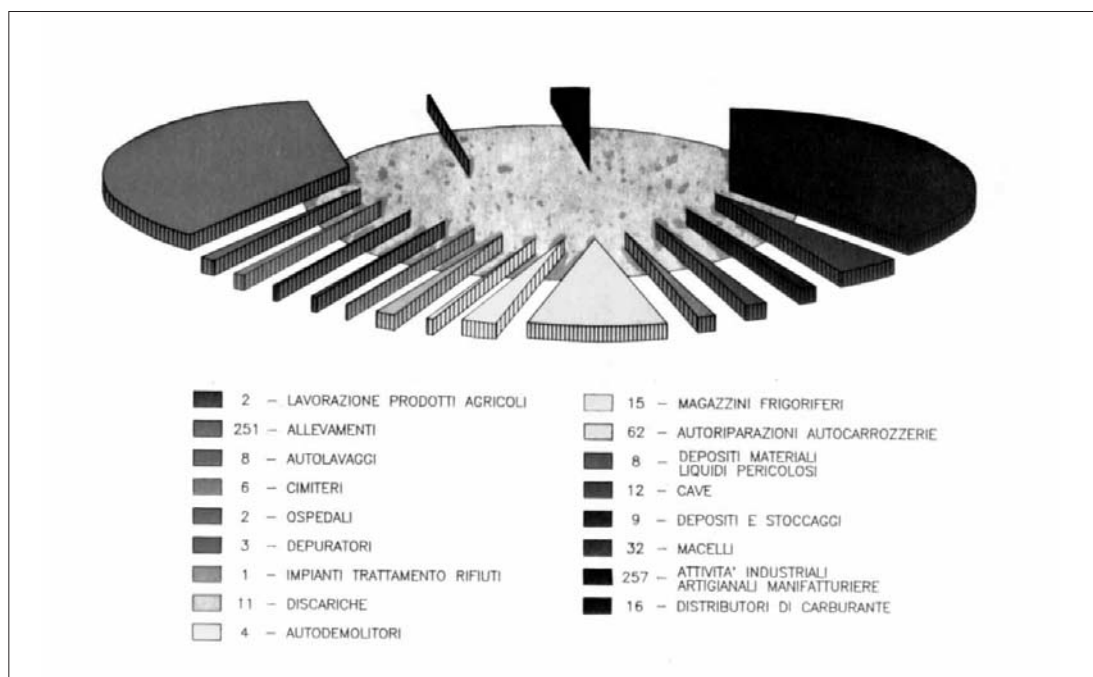






















Figura 3. 32. – Esempio dei risultati del censimento delle attività di pressione antropica (CDP) in un'area del Torinese.

## Carte di vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento

Legenda unificata dei simboli<sup>14</sup>












	Punto di recapito di collettore di acque reflue urbane e/o industriali (non trattate).
	Pozzo perdente, fossa settica, ecc.
	Area urbana o assimilabile, sprovvista di rete fognaria (1).
	Area urbana o assimilabile, provvista di rete fognaria (1).
	Collettore principale di rete fognaria.
	Ospedale, luogo di cura.
	Mattatoio.
	Cimitero.
	Aeroporto commerciale.
	Porto-petroli fluviale.
	Campeggio, campo-nomadi, insediamento provvisorio o/e abusivo (baracopoli).
	Coltivazioni intensive in serra.
	Punto di sversamento/travaso, accidentale o doloso di liquidi tossici e nocivi sul/nel sottosuolo.
	Strada di grande traffico, autostrada, superstrada.
	Industria zootecnica. N.B. Ove possibile, indicare con numeri romani accanto al simbolo la classe di consistenza: <b>I</b> = meno di 50 capi; <b>II</b> = 50-200; <b>III</b> = 200-500; <b>IV</b> = 500-2000; <b>V</b> = 2000-5000; <b>VI</b> = oltre 5000.
	Allevamento con stabulazione libera.
	Allevamento: suini.
	Allevamento: bovini.
	Allevamento: ovicapri ed equini.
	Allevamento: piscicoltura.

<sup>14</sup> Da Civita & De Maio (2000), opportunamente semplificata.

	Allevamento: ovicunicoli.
	Area sterile, incolta o con colture spontanee o che non prevedono trattamenti con fitofarmaci, concimi chimici, ecc.
	Area con colture che prevedono limitati trattamenti con fitofarmaci, concimi chimici, ecc.
	Area con colture che prevedono frequenti ed abbondanti trattamenti con fitofarmaci, concimi chimici, ecc.
	Area soggetta ad irrigazione per sommersione o per scorrimento. Risaia, marcita.
	Deposito di prodotti chimici ed altri materiali ad uso agricolo.
	Concimaia, stoccaggio di deiezioni animali (liquide e/o solide) se separate dall'allevamento.
	Cava in attività ( <b>P</b> = scavo che raggiunge la superficie piezometrica della falda soggiacente).
	Cava abbandonata ( <b>P</b> = scavo che raggiunge la superficie piezometrica della falda soggiacente).
	Cava ritombata.
	Pozzo, abbandonato o/e malcostruito, potenzialmente capace di connettere l'inquinamento di superficie all'acquifero soggiacente.
	Forme carsiche diffuse (Indice di carsismo = 0.5-1; 1-5; > 5).
	Campo carsico con doline.
	Cavità carsica orizzontale ( <b>a</b> = attiva; <b>b</b> = temporaneamente attiva; <b>c</b> = inattiva).
	Inghiottitioio, pozzo verticale, abisso, punto di sparizione di un corso d'acqua superficiale ( <b>a</b> = attivo; <b>b</b> = temporaneamente attivo).
	

	Impianto di depurazione di acque reflue urbane (solo primario).
	Impianto di depurazione di acque reflue urbane (primario e secondario).
	Impianto di depurazione di acque reflue urbane (primario, secondario e terziario).
	Discarica (prima categoria).
	Discarica (seconda categoria tipo A).
	Discarica (seconda categoria tipo B).
	Discarica (seconda categoria tipo C).
	Discarica (terza categoria).
	Centro di trattamento per rifiuti tossici e nocivi (RTN) e assimilabili.
	Centro di trattamento per rifiuti solidi urbani (RSU) e assimilabili.
	Zona di rispetto di opera di captazione a scopo idropotabile (tempo di sicurezza = 60 g).
	Spartiacque sotterraneo. Limite di idrostruttura.
	Direzione del flusso (falde acquifere).
	Direzione del flusso (reti acquifere).
	Curva isopiezometrica e relativa quota.



	Pozzo di captazione a scopo industriale e/o agricolo (C = captazione di più acquiferi sovrapposti).
	Pozzo di captazione a scopo idropotabile (C = captazione di più acquiferi sovrapposti).
	Campo-pozzi (C = captazione di più acquiferi sovrapposti).
	Sorgente importante non captata.
	Sorgente importante captata a scopo idropotabile.
	Sorgente o gruppo sorgivo termale (T) e/o minerale (M) (Lettere affianco al simbolo).
	Perimetro di recinzione-protezione delle opere di presa.
	Traccia del cono di depressione indotto dal pompaggio in periodo di magra.
	Acquedotto.
	Galleria drenante, trincea drenante, opera di presa «in falda» di sorgenti.
	Serbatoio interrato, in caverna per acque potabili.



## 4. Elaborazioni delle informazioni con metodi GIS

### 4.1 Il modello dei dati

Allo scopo di rappresentare e gestire le informazioni spaziali mediante un GIS, è necessario utilizzare una rappresentazione dei dati che sia sganciata dalla realtà fisica; questo viene realizzato definendo un modello dei dati che sia abbastanza ampio da accogliere al suo interno tutti gli oggetti che esistono nel mondo fisico (aree, linee, punti, quote, ecc.) e che sia sufficientemente elastico da permettere di adattarlo a tutte le combinazioni che effettivamente occorrono nella realtà.

Rispetto ad una rappresentazione puramente geometrica degli oggetti presenti nella realtà, un GIS permette di mantenere e gestire tutte le informazioni che riguardano le mutue relazioni spaziali tra i diversi elementi, come la connessione, l'adiacenza, o l'inclusione, cioè di strutturare i dati definendone anche la topologia. Oltre a questi due aspetti, geometrico e topologico, il modello dei dati, per essere efficace, deve prevedere l'inserimento al suo interno dei dati descrittivi dei singoli oggetti reali, definibili come attributi.

Questi tre insiemi di informazioni (geometria, topologia, attributi) vengono poi effettivamente implementati in un GIS mediante uno specifico modello fisico, che oggi si basa su strutture dei dati di tipo relazionale, tipiche dei database più evoluti, e su architetture hardware e software di tipo client-server, tipicamente in reti locali di elaboratori.

Caratteristica fondamentale di un GIS è la sua capacità di georeferenziare i dati, ovvero di attribuire ad ogni elemento le sue coordinate spaziali reali. In altre parole, le coordinate di un oggetto non sono memorizzate relativamente ad un sistema di riferimento arbitrario (ad esempio 12 centimetri dal bordo inferiore e 5 da quello sinistro di una mappa), né relativamente al sistema di coordinate della periferica usata, come la tavoletta digitalizzatrice o il video, ma sono memorizzate secondo le coordinate del sistema di riferimento in cui realmente è situato l'oggetto e nelle reali dimensioni, non in scala. La scala di rappresentazione diventa, a questo punto, solamente un parametro per definire il grado d'accuratezza e la risoluzione delle informazioni grafiche, e quindi utilizzabili, ad esempio, per definire la densità di rappresentazione: ad una scala minore, elementi come gli edifici non sono rappresentati e compaiono gli isolati o le aree urbanizzate.

#### 4.1.1 I sistemi di rappresentazione cartografica

L'aver introdotto il concetto di sistema di riferimento porta immediatamente ad introdurre l'uso delle rappresentazioni cartografiche. Mediante le rappresentazioni cartografiche, si può descrivere compiutamente la superficie fisica tridimensionale della Terra su di un piano, mantenendo alcune proprietà geometriche quali l'isogonia o l'equivalenza.

Le più utilizzate, oltre alla rappresentazione geografica (che in effetti non è una proiezione ma solo un sistema di riferimento) sono l'UTM, la Gauss-Boaga, la Lambert oltre alla conica, stereografica polare, e diverse altre.

Le Carte geografiche e topografiche sono piatte ma le superfici che esse rappresentano sul globo sono curve. Il concetto di rappresentazione cartografica è, quindi, richiesto per rappresentare uno spazio tridimensionale su una carta a due dimensioni. Una Carta accurata deve indicare in legenda il nome ed i parametri del sistema di rappresentazione adottato.

Durante il processo di rappresentazione dei dati reali su un foglio di carta, si introducono inevitabilmente delle deformazioni. Anche i più raffinati sistemi di rappresentazione comportano distorsioni di almeno una delle caratteristiche geometriche: forma, area, distanza.

Una distinzione tra i diversi sistemi di rappresentazione viene operata proprio sulla base delle caratteristiche del mondo reale rispettate: le rappresentazioni equivalenti preservano le aree, le rappresentazioni conformi gli angoli. Ne consegue che non esiste un sistema di rappresen-

tazione preferibile in assoluto e che l'adozione di un sistema piuttosto che un altro dipende dall'uso cui è destinata la cartografia e dalla zona da rappresentare.

#### 4.1.2.1 Sistemi di riferimento

Per ogni rappresentazione, viene definito anche un sistema di riferimento utilizzato per la misura delle coordinate. Ad esempio, nel sistema UTM si utilizzano spicchi predeterminati ampi sei gradi in latitudine, detti fusi, con un sistema di coordinate ortogonali all'interno di ogni fuso. Nella rappresentazione Gauss-Boaga, il riferimento è, per il fuso ovest il meridiano 9° e per il fuso est il meridiano 15°. Le coordinate piane dei punti si indicano in genere con le lettere N ed E e si ha:

$$N = y \quad (4.1)$$

mentre per evitare i valori negativi delle ascisse per punti ad ovest del meridiano di riferimento:

$$E = x + \text{cost.} \quad (4.2)$$

dove il valore della costante (falsa origine) si assume pari a 1500 km per il fuso ovest e pari a 2520 km per il fuso est; così dal valore della E di un punto si può subito dedurre in quale fuso il punto si trova. L'archiviazione dei dati, una volta definito il sistema di riferimento e il modello dei dati stessi, avviene normalmente utilizzando due formati: vettoriale e raster. Per dati vettoriali si intendono dati geometrici memorizzati attraverso le coordinate dei punti significativi degli elementi stessi: ad esempio, una linea curva qualsiasi viene descritta dalle coordinate dei vertici della spezzata che, con una "densità di campionamento" definita a monte, assimila al meglio la linea stessa. Per dati raster si intendono, invece, dati memorizzati tramite la creazione di una griglia regolare in cui, ad ogni cella (assimilabile ad un pixel), viene assegnato un valore alfanumerico che ne rappresenta un attributo: in questo modo, per esempio, le aree possono essere rappresentate da insiemi di celle adiacenti con lo stesso valore. I valori assegnati alle celle possono rappresentare, sia singoli fenomeni naturali o antropici (temperatura, uso del suolo, ecc.), sia il risultato di combinazioni di più informazioni attraverso metodologie di analisi (ad es.: la risultante, per ogni cella, della combinazione di temperatura, direzione del vento, tipo di copertura vegetale) o anche, semplicemente, attributi grafici come la tonalità di grigio o il colore. Normalmente in Italia per i dati ambientali i sistemi di riferimento più utilizzati sono il Gauss-Boaga e l'UTM, anche la maggior parte della Carte di vulnerabilità già realizzate sono realizzate in questi sistemi. Ciò spesso è dovuto anche alla necessità di utilizzare come base raster, sia di restituzione che come base per la raccolta dei dati, le Carte Tecniche Regionali (CRT), già georeferenziate in questi sistemi.

#### 4.1.3. I dati vettoriali

All'interno di un GIS, i dati sono memorizzati secondo diverse strutture-dati, spesso proprietarie. Allo scopo di permettere il dialogo ed il trasferimento dei dati tra i diversi sistemi, sono stati definiti diversi formati di trasferimento.

Tipici dati memorizzati in formato vettoriale sono quelli che provengono dalla digitalizzazione manuale delle mappe, dai rilievi topografici con strumenti di campagna o rilievi GPS (Global Positioning Systems), dai programmi CAD. I relativi standard di trasferimento più comuni sono il DXF e l'IGES; più specificatamente per la cartografia esistono i formati NTF (National Transfer File), VPF, IGDS, DIGEST.

Volendo approfondire le problematiche legate alla conversione fra formati vettoriali GIS e CAD, bisogna ricordare che i dati vettoriali GIS sono sempre accompagnati da informazioni topologiche. La conversione tra i due formati deve quindi seguire procedure particolari. Questa, che sembra una precisazione superflua, è invece una regola spesso dimenticata. Ad esempio, in un CAD, un rettangolo (che rappresenta una piscina o un campo da tennis) non deve necessariamente essere delimitato da una poligonale chiusa. L'importare per un CAD, infatti, è poter riprodurre quel rettangolo su un plotter o a video.

Per un GIS, invece, il rettangolo è una piscina, con le sue coordinate reali, il valore della sua superficie ed i suoi attributi (profondità, nome del proprietario, ecc.): pertanto, è memorizzato come un'area chiusa e quindi gli archi che lo delimitano devono essere necessariamente connessi. Ecco perché, nel convertire i dati relativi a quel rettangolo da un CAD verso un GIS, occorre ricostruire la topologia dell'oggetto, oltreché calcolarne alcuni attributi (perimetro, superficie, ecc.), cosa che il software può fare (definendo tolleranze per la chiusura dei poligoni, regole formali per la condivisione di primitive grafiche, ecc.), ma che spesso richiede l'intervento di un operatore.

Devono essere implementati come dati vettoriali per una Carta di Vulnerabilità integrata tutti i CDP come punti, tutte le strade, le reti fognarie, i metanodotti, gli acquedotti, le ferrovie come dati vettoriali lineari, la geologia, l'idrogeologia, l'uso del suolo, il pannello piezometrico, la conducibilità idraulica, il coefficiente di infiltrazione potenziale tutti come dati vettoriali poligonali.

#### 4.1.4 I dati raster

Tipici dati raster sono quelli generati dagli scanner e dai programmi di interpretazione di immagini come quelli utilizzati per le immagini da satellite. In tale caso gli standard più comuni sono TIFF, RLC, LAN, BIP, GRASS e GRID, spesso utilizzati in diversi campi di applicazione.

Nel caso di dati raster, entrano in gioco tre fattori: la risoluzione, la compressione e la registrazione.

La risoluzione dipende dalla fonte dei dati; ad esempio, le immagini ottenute con il satellite per il telerilevamento LANDSAT possono avere una risoluzione al suolo fino a 30 x 30 metri, quelle ottenute dal satellite SPOT hanno una risoluzione fino a 10 x 10 metri. Nel caso di immagini raster ottenute da scanner parleremo di risoluzioni riferite al pixel dell'immagine ed espresse in dpi (dots per inch). Esse sono dell'ordine di centinaia o migliaia di dpi, ossia di dimensioni del pixel da qualche centesimo di millimetro a pochi millesimi (micron). Nel caso di griglie costruite appositamente per l'analisi territoriale (modulo GRID di ARC/INFO, o Spatial Analyst di ARCVIEW), ad esempio contenenti dati relativi alla vulnerabilità, la risoluzione dipenderà dalla metodologia scelta per la raccolta dei dati e dall'ampiezza dell'area in studio. Tipicamente, in questi casi si parla di risoluzioni dell'ordine delle decine di metri al suolo.

Per compressione si intende, invece, la capacità di comprimere i dati raster (che generalmente richiedono da cento a mille volte più spazio di quelli vettoriali) per renderli più maneggevoli. Il vantaggio ottenuto nella memorizzazione viene chiaramente compensato dai tempi di compressione e decompressione del dato, che deve sempre essere decompresso prima di essere utilizzato.

Per registrazione si intendono le tecniche necessarie a georeferenziare le immagini raster e a correggerne le deformazioni geometriche.

Nel modello dati di un GIS, dati vettoriali e dati raster coesistono e si integrano a vicenda, e sono generalmente usati i primi per dati discreti e i secondi per dati continui. Entrambi i tipi di dati possono essere associati ad attributi: per i primi saranno legati alle primitive grafiche e agli oggetti, per i secondi ai singoli pixel.

Vengono caricati come dati raster le Carte Tecniche Regionali, ove non realizzate già in formato vettoriale, tutte già georeferenziate.

I dati provenienti da immagini da satellite, quali Landsat, SPOT ad esempio molto utili per l'analisi dell'uso del suolo, per l'individuazione di lineazioni principali e presenza di umidità utili per la definizione dell'indice di fratturazione a grande scala.

Le foto aeree scansionate e georeferenziate, o ove possibile acquisite già in formato digitale, utili per definire l'indice di fratturazione, a piccola scala, nella definizione delle forme carsiche superficiali (doline, inghiottitoi, polje) necessari per la determinazione dell'indice di carsismo.

#### 4.1.5. *La modellazione tridimensionale*

Un'altra importante caratteristica del modello-dati di un GIS è la capacità di gestire oggetti tridimensionali. Non si intende riferirsi ad un attributo che indichi l'altezza di un oggetto, ma a un sistema a tre coordinate reali. I modelli tridimensionali sono generati in due modi: quando si dispone di un insieme sparso di elementi quotati, si utilizza generalmente un algoritmo che crea un TIN (Triangulated Irregular Network), costruendo una rete di triangoli i cui vertici sono costituiti dai punti di cui si conoscono le tre coordinate. Se si dispone, invece, di un insieme di punti quotati ordinati in griglie a passo regolare si parla di DTM (Digital Terrain Model) o DEM (Digital Elevation Model). A partire da un TIN, un DTM o un DEM è possibile interpolare curve di livello, effettuare analisi di visibilità, generare profili longitudinali, effettuare analisi di pendenza e di esposizione, clivometrie, generare viste 3D, ecc. Ma soprattutto è possibile calcolare lunghezze reali, e non ridotte all'orizzonte, dato che elementi come le strade, ad esempio, hanno anche un andamento altimetrico, non sono "piatte".

La possibilità di importare ed elaborare un DTM è fondamentale per il calcolo automatico dell'acclività della superficie topografica, parametro importantissimo in entrambe i metodi di valutazione della vulnerabilità.

Nonché nel calcolo del parametro Infiltrazione efficace uno dei 7 parametri del metodo SINTACS (Civita e De Maio, 2000).

#### 4.1.6 *Gli attributi*

In ogni caso l'elemento più importante del modello dati di un GIS rimangono sempre gli attributi. Infatti una applicazione per la rappresentazione di Carte tematiche ha l'obiettivo principale di produrre su carta dei tematismi, mentre caratteristica fondamentale di un GIS è la possibilità di effettuare un'analisi sugli attributi, per diventare uno strumento di supporto alle decisioni.

L'utente GIS non ha solo bisogno di restituire, ad esempio, una Carta delle zone esondate, quanto di rappresentare un tematismo, cioè ad esempio di ritrarla in funzione dei livelli raggiunti dall'acqua durante l'esondazione. Per ottenere questo potrebbe interrogare una banca dati di tipo relazionale. Per esempio, ad ogni edificio potrebbe essere associato un indirizzo, mentre in un altro database (quello anagrafico) ad ogni indirizzo potrebbe essere associato il numero di persone che risiedono in quell'edificio, la loro età anagrafica, ecc. Tramite, quindi, l'informazione "indirizzo", si potrebbe creare una relazione tra i due database ed effettuare un'analisi relativa all'età media restituendola poi graficamente su carta.

Dalla stessa analisi si potrebbe derivare un nuovo tematismo relativo all'anzianità dei residenti e, utilizzandolo in sovrapposizione con la Carta delle aree esondabili, predisporre eventuali piani di evacuazione in caso di esondazione.

Gli attributi, che possono risiedere anche su più sistemi ed essere aggiornati da molteplici applicativi, sono in genere memorizzati in database relazionali ed interrogabili mediante linguaggi di tipo SQL (Structured Query Language).

Una struttura relazionale del database, accuratamente progettata, permette di effettuare diverse analisi sui dati, senza essere costretti a percorsi obbligati. La capacità di integrare nel modello dati di un GIS attributi provenienti da diversi database, anche raggiunti in rete locale



o geografica, mediante strutture relazionali e secondo formalismi SQL è oggi una necessità imprescindibile data la continua implementazione di archivi informatizzati.

## 4.2 Parametri e standard dei dati GIS

### 4.2.1 I tipi di dati

L'evoluzione dei GIS è stata fortemente influenzata dalla dicotomia tra i formati raster e quelli vettoriali. Al fine di superare tale dicotomia ed usufruire delle potenzialità offerte da ciascuno dei due formati, i GIS dell'ultima generazione tendono ad integrare le due tipologie nel miglior modo possibile permettendo la convivenza dei dati in strutture omogenee di archivi, la conversione dei formati e l'elaborazione interconnessa dei dati.

L'analisi delle caratteristiche dei due formati di dati permette di compararli e di evidenziare le peculiarità di ciascuno di essi rispetto all'accuratezza, la risoluzione, l'associazione di attributi, il volume dei dati, le tecniche di restituzione e gli algoritmi di elaborazione.

### 4.2.2 L'accuratezza

L'accuratezza delle rappresentazioni digitali di dati spaziali dipende dai requisiti imposti dall'utente ed è legata alla sorgente dei dati (cartografia, immagini, ecc.) e alle metodologie e strumenti usati per acquisirli.

I dati vettoriali vengono generalmente acquisiti attraverso rilievi aerei o direttamente da cartografia. In tal caso, l'accuratezza è fortemente relazionata alle regole di interpretazione del dato-sorgente e alla precisione in fase di digitalizzazione dell'informazione.

Regole poco precise comportano eccessiva discrezionalità da parte dell'operatore in fase di interpretazione. Anche la scelta di metodologie e di strumenti di acquisizione appropriati al tipo di informazioni è di fondamentale importanza per assicurare una buona accuratezza del dato.

L'accuratezza è assicurata, comunque, da metodologie di controllo di qualità del dato molto onerose, ma necessarie per questa tipologia di formato. D'altro canto, l'accuratezza ottenibile va a favore delle tecniche di elaborazione dei dati che sfruttano la continuità del formato vettoriale. Nella maggior parte dei casi l'accuratezza del dato raster dipende, invece, dagli strumenti d'acquisizione.

Per esempio, per le immagini telerilevate, l'accuratezza è determinata dalle piattaforme satellitari ed aeree. Le oscillazioni dei mezzi che trasportano i sensori provocano deformazioni delle immagini che possono essere corrette, con maggiore o minore precisione in fasi successive di elaborazione del dato. Anche l'informazione radiometrica influenza l'accuratezza del dato.

Per quanto riguarda i dati di tipo cartografico acquisiti con strumenti di scansione (scanner), l'accuratezza è legata essenzialmente alla precisione strumentale senza peraltro sottovalutare l'influenza determinata dalle tecniche software di discretizzazione.

In sintesi possiamo considerare l'accuratezza dei dati raster più sistematica e meno discrezionale, pur non sottovalutando la difficoltà nel controllo dell'errore presente per entrambi i formati.

### 4.2.3 La risoluzione

La risoluzione del dato spaziale descrive la relazione tra la distanza come misura nel reale e la distanza come misura della sua rappresentazione digitale o su carta.

La risoluzione è legata al fattore di scala cartografica anche se non può essere direttamente relazionata alla dimensione fisica di ogni elemento grafico.



In pratica, mentre la dimensione del lato della cella elementare nel formato raster definisce la risoluzione del dato (cella 10 m x 10 m = risoluzione di 10 m), nel formato vettoriale la risoluzione può essere associata alla distanza minima fra due vertici di una spezzata, che è fortemente influenzata dalla scala di rappresentazione cartografica del documento-sorgente. Tale distanza minima, infatti, viene solitamente assunta pari a  $0,5 \div 1$  mm sulla carta.

Con tecniche di scansione e vettorializzazione automatica, invece, tale distanza come parametro di risoluzione può avere maggior senso. Infatti, in tal caso, il dato vettoriale è ricavato da un formato raster, pertanto la distanza fra i nodi di una spezzata è legata alla risoluzione del dato raster.

Per quanto riguarda i dati rilevati direttamente sul terreno con tecniche topografiche, la risoluzione è legata agli strumenti utilizzati ed alle tecniche di rilievo.

In sintesi, poiché il parametro di risoluzione è così diversificato nei due formati, deve essere necessariamente comparato con gli altri fattori indicati in questo capitolo.

#### 4.2.4 *L'associazione di attributi*

Come già detto, una peculiarità che distingue i GIS dai sistemi di cartografia numerica più tradizionali, è la possibilità di associare ad oggetti rappresentati da punti, linee o aree sul territorio, attributi ed informazioni di vario tipo (dati alfanumerici, testi, foto, disegni, ecc.).

Per i dati raster, è possibile associare ad ogni cella elementare, rappresentativa di una certa area sul territorio, un numero infinito di attributi. Inoltre, a classi di attributi possono essere associate ulteriori informazioni.

Per esempio, in un'immagine da satellite ad ogni cella sono associate le risposte spettrali delle diverse bande, oltre a poter essere associato il valore di classe di uso del suolo calcolato, con opportuni algoritmi, sulla base delle varie risposte spettrali. Per quanto riguarda il formato vettoriale, gli oggetti presenti sul territorio possono essere rappresentati da elementi puntuali, lineari o poligonali o da insiemi composti di questi elementi di base.

Ad ogni elemento o ad ogni insieme di elementi, è possibile associare un numero infinito di attributi e definire le relazioni che sussistono fra di essi. Generalmente, gli attributi del formato vettoriale sono inseriti in un database relazionale. Pertanto, la definizione di tabelle e relazioni può essere considerata dinamica e flessibile nel tempo, cosa che offre potenzialità molto vaste nella struttura degli archivi e nelle applicazioni.

In sintesi, mentre il formato raster, per la stessa struttura logica delle informazioni, si presta bene a gestire dati tematici, il formato vettoriale è molto più indirizzato verso strutture complesse di relazione fra le informazioni descrittive legate agli oggetti rappresentativi del territorio.

E' generalizzata l'idea che i dati in formato raster occupino molta memoria di massa. Infatti, l'occupazione di una copertura raster è data dal numero di righe per il numero di colonne per il numero di bit necessari a contenere l'informazione descrittiva.

Naturalmente, per certe tipologie di dati raster (tematici e cartografie) è possibile usare metodi di compressione che riducono di un certo fattore la quantità di memoria occupata.

Nonostante questo, quando si parla di archivi di banche dati geografiche in formato raster, le quantità di memoria richieste sono sempre dell'ordine dei Gigabyte (= 10<sup>9</sup> byte).

Il formato vettoriale è, invece, noto per essere più economico dal punto di vista del volume dei dati.

In questo caso, però, va posta molta attenzione alla risoluzione geografica richiesta, in quanto un dato ad alta risoluzione, acquisito, per esempio, vettorializzando da una mappa raster, può occupare una buona quantità di memoria.

In sintesi il formato raster può essere senz'altro considerato il formato che necessita di maggiore quantità di memoria di massa, tenendo presente comunque che in alcuni casi anche il dato vettoriale può richiedere quantità al di sopra della media.

#### 4.2.5 *Gli algoritmi di elaborazione*

Un'altra differenza sostanziale tra i GIS ed i software di cartografia numerica è la possibilità intrinseca dei primi di elaborare i dati geografici attraverso algoritmi matematici.

La disponibilità di algoritmi di elaborazione dei dati è un parametro molto importante per valutare le potenzialità di uno strumento GIS.

Per le due tipologie di formato-dati, si tralasciano qui le funzioni generali quali quelle di ri-classificazione, unione in adiacenza, generalizzazione, eliminazione di distorsioni, ecc. che, se pur diverse come approccio matematico e metodologico, incidono meno nella comparazione tra i due sistemi.

Gli algoritmi di overlay mapping, cioè di sovrapposizione ed integrazione di più strati informativi sono presenti per entrambi i formati. Nel formato raster sono più semplici dal punto di vista matematico e più intuitibili dal punto di vista utente e permettono infinite combinazioni di strati. Per il formato vettoriale, sono più complessi in tutti i sensi, ma sicuramente più precisi poiché elaborano dati sul continuo e non sul discreto.

Per gli algoritmi di buffering, cioè di generazione di aree di rispetto intorno ad elementi geografici, e per la famiglia di algoritmi per l'elaborazione di modelli digitali del terreno, valgono le stesse considerazioni sopra descritte.

Alcuni algoritmi, invece, sono disponibili solo sulla tipologia di formato che facilita l'approccio al problema.

Gli algoritmi per l'analisi di intorno o per la ricerca di percorsi di minimo costo sono tipici del formato raster, mentre gli algoritmi per l'allocazione di risorse, per la ricerca di percorsi ottimali, di segmentazione dinamica, sono tipici del formato vettoriale.

In sintesi i due formati si distinguono proprio in base alla disponibilità di algoritmi di elaborazione.

### 4.3 **Funzioni ed operatori GIS**

Fino ad ora sono state descritte le differenze tra i sistemi CAD ed i GIS, relativamente alla tipologia dei dati che vengono gestiti da ciascuno di questi sistemi.

Se una organizzazione dei dati di tipo topologico caratterizzava già i sistemi GIS, la loro capacità di effettuare operazioni di analisi spaziale li distanzia ulteriormente e definitivamente dal mondo dei sistemi nati per effettuare operazioni di sola cartografia e disegno al computer.

Mediante tale analisi, partendo dalle informazioni esistenti nel nostro database geografico possono essere creati nuovi livelli informativi, associando i dati in maniera da identificare relazioni prima non chiaramente visibili. Tipici esempi sono le analisi effettuate con la semplice sovrapposizione di più livelli informativi (overlay) come l'uso del suolo e i dati catastali, allo scopo di identificare, per ogni proprietà (particella catastale), la tipologia di uso del suolo.

Analisi più sofisticate possono essere effettuate con la combinazione di diversi operatori anche estremamente complessi, che elaborano dati sia bidimensionali sia tridimensionali.

In una categoria a parte si pongono gli operatori specializzati per la gestione ed analisi delle reti a grafo, che operano su una struttura dati topologica di tipo lineare avente degli attributi alfanumerici particolari, necessari ad effettuare le analisi di connettività, minimo percorso, allocazione di risorse ecc. tipiche delle reti a grafo. Una estensione del modello topologico lineare è la segmentazione dinamica. Mediante tale estensione e le relative funzioni disponibili per la sua gestione, alla struttura topologica fisica è possibile sovrapporre una nuova topologia, definita in maniera logica, senza la necessità di modificare i dati presenti nel database.

La possibilità data da un modello dei dati, come quello georelazionale, di poter essere esteso senza necessità di riformulare radicalmente la sua struttura, dimostra ancora una volta la validità della sua scelta come struttura di base per un Geographical Information System.

#### 4.3.1 *L'overlay topologico*

Probabilmente, le funzioni di overlay sono state le prime a essere implementate in un GIS, e rimangono ancora oggi le funzioni di base in questi sistemi. Concettualmente, si tratta di funzionalità molto semplici, ma solamente una struttura dei dati completamente topologica permette di realizzarle in modo efficace. Infatti, il risultato della sovrapposizione di diversi livelli informativi non deve essere solamente visivo, cioè dare la possibilità di vedere gli elementi sovrapposti, ma deve soprattutto essere a livello degli attributi, che devono essere riportati da un livello informativo all'altro, in relazione agli elementi corrispondenti.

Le sovrapposizioni (overlay) possono essere suddivise in tre categorie principali: punti su poligoni, linee su poligoni, e poligoni su poligoni; comune a tutte le operazioni di overlay è che almeno uno dei due tematismi considerati sia di tipo poligonale.

Se, ad esempio, si pone, come livello poligonale, una Carta dell'uso del suolo, mediante le funzioni di overlay si può attribuire la tipologia del suolo in cui cade uno scarico (punto su poligono), un oleodotto (linea su poligono), l'area occupata da un'industria (poligono su poligono). Il nuovo livello informativo conterrà, oltre che tutti gli attributi rispettivamente dello scarico, dell'oleodotto o dell'industria, anche tutte le informazioni che sono associate alla Carta poligonale di uso del suolo.

Mediante questi operatori sono possibili sofisticate analisi di tipo ambientale e scientifico: si pensi, in campo idrogeologico, in particolare per determinare la vulnerabilità degli acquiferi, alla possibilità di sovrapporre Carte diverse riportanti la soggiacenza, l'infiltrazione, il non saturato, la tipologia della copertura, le caratteristiche dell'acquifero, la conducibilità idraulica delle formazioni attraversate, l'acclività della superficie topografica. Tali analisi tipiche delle scienze ambientali risultano grandemente facilitate dalla presenza degli operatori di overlay.

#### 4.3.2 *Il buffering*

Spesso capita di dover determinare delle aree di rispetto intorno a specifici elementi geografici. Ad esempio, le leggi per la tutela dell'ambiente prevedono l'inedificabilità entro una specifica distanza dalle rive di corsi d'acqua, laghi e mari.

La risposta a questi specifici problemi viene agevolmente data da un GIS grazie alle sue funzioni di buffering, in grado, cioè, di creare un'area di rispetto intorno alle entità territoriali che sono presenti nel database. La possibilità di modulare questa operazione in funzione delle necessità dell'operatore dà modo di trovare soluzione, con pochi passaggi, a problemi altrimenti difficilmente risolvibili; ad esempio la capacità di effettuare buffering asimmetrici rispetto, ad es. ai due lati di un elemento lineare oppure di effettuare un buffering parametrizzato a seconda delle caratteristiche dell'elemento. Per creare fasce di rispetto intorno alle linee elettriche, si può usare come parametro discriminante la tensione di esercizio, creando fasce maggiori per più alte tensioni della linea.

Una volta creata la fascia di rispetto, che sia intorno ad un punto, linea o poligono, il risultato è sempre un livello informativo di tipo poligonale, che può essere utilizzato per successive analisi; ad esempio, effettuando l'overlay della Carta della vegetazione con le fasce di rispetto create intorno ad una strada in costruzione, può essere valutata la superficie e la tipologia della vegetazione coinvolta nel progetto.

#### 4.3.3 *L'analisi di rete*

Lo spostamento delle persone, il trasporto e la distribuzione di beni e servizi, la distribuzione dell'energia, le comunicazioni: tutte queste attività prevedono lo spostamento di materia o di informazioni mediante dei sistemi di reti, che sempre più costituiscono una delicata e vitale infrastruttura del mondo di oggi.

La forma, la capacità e l'efficienza delle reti ha quindi un impatto non trascurabile sull'attuale standard di vita e comunque influenza la nostra visione del mondo.

Le funzioni principali che possono essere effettuate mediante un GIS sulle reti, di qualsiasi tipo esse siano (trasporto, distribuzione, comunicazione, ecc.), sono fondamentalmente: la ricerca del minimo percorso su una rete, o comunque del percorso meno costoso; l'allocazione di porzioni della rete ad un fornitore o consumatore di risorse; la verifica delle connettività tra due punti della rete.

**Minimo percorso** – le funzioni di analisi di rete offrono la soluzione ad un problema di base: determinare il percorso minimo o, comunque, il più efficace, per attraversare una rete passando per determinate località di questa. Il costo può essere determinato utilizzando un qualsiasi attributo presente sugli elementi costituenti la rete. Per esempio: tenuto conto che una rete a grafo è tipicamente rappresentata con archi connessi tramite nodi, si immagini di rappresentare una rete stradale i cui simboli siano gli archi per l'asse e i nodi per gli incroci: la distanza o il tempo di percorrenza lungo un arco del grafo possono essere utilizzati per identificare il minimo percorso in termini di distanza o di tempo lungo la rete viaria.

**Allocazione di risorse** – per effettuare queste analisi bisogna disporre di un centro che offra risorse e di una domanda di queste sulla rete, o, viceversa, di una offerta sulla rete e di una capacità ricettiva su di un centro. A titolo di esemplificazione, mediante l'uso delle funzioni di allocazione secondo quest'ultima modalità, può essere affrontato e risolto un problema tipico della gestione dell'emergenza in caso di calamità: determinare piani di evacuazione allocando la popolazione nelle strutture di ricovero.

Questa analisi viene effettuata rappresentando eventuali aree attrezzate come centri di raccolta, e riportando la distribuzione della popolazione sul grafo che rappresenta la rete viaria cittadina: in questo modo si può determinare il numero massimo di persone che, convogliate nei centri di raccolta ad essi più vicini, ne determinano la saturazione; si può anche identificare quali parti della rete stradale contribuiscono maggiormente al riempimento di un centro di accoglienza piuttosto che un altro.

Operazioni analoghe possono essere effettuate per allocare studenti nelle scuole, o gestire la raccolta dei rifiuti solidi urbani in una grande città.

**Connettività** - le funzioni per la verifica della connettività servono ad identificare se e quali porzioni di una rete sono connesse. Ad esempio, una società per la gestione di un acquedotto può avere bisogno di sapere quale impianto presente sulla rete serve un determinato utente, e, nel caso di interruzione o guasto, quale percorso alternativo può essere adottato per mantenere la funzionalità del sistema.

#### 4.3.4 *Gli operatori raster e tridimensionali*

La necessità di operare da un unico ambiente su diverse tipologie di dati ha spinto l'evoluzione dei sistemi GIS verso sistemi integrati, in cui siano disponibili operatori in grado di effettuare analisi su dati bi- e tridimensionali, oltre che raster.

Le funzionalità di visualizzazione dei dati raster, in diversissimi formati, hanno aperto la strada all'integrazione di dati telerilevati, anche da satellite, con i dati di tipo vettoriale. Ma la successiva implementazione di una serie completa di operatori in grado di elaborare dati di tipo raster ha praticamente portato all'interno dei GIS funzionalità che erano prerogativa esclusiva dei



sistemi di image processing. Tali funzionalità, in grado di operare su dati di tipo matriciale, hanno aperto la strada ad una serie di applicazioni specifiche, difficilmente realizzabili mediante l'approccio vettoriale: la modellazione idrogeologica, la ricerca di superfici di minimo costo (analoghe alla ricerca del minimo percorso), l'interpolazione di dati puntuali per la generazione di superfici tridimensionali o la derivazione di curve di livello, sono tutte operazioni che sono state implementate in maniera straordinariamente efficace su strutture dati di tipo matriciale. Mediante una sola specifica funzione, ad esempio, è possibile derivare la struttura di un reticolo fluviale partendo da un modello digitale del terreno, e quindi codificare i vari rami del reticolo così identificati; o calcolare l'esposizione di una superficie rispetto ad una sorgente luminosa, potendo modificare in tempo reale tutti i parametri relativi all'orientamento della sorgente e del modello tridimensionale sotto osservazione. Alcune di queste funzionalità, che operano su dati raster, trovano un ulteriore sviluppo nelle funzioni di modellazione tridimensionale, in cui sono disponibili operatori utili per determinare la reciproca visibilità di due punti, effettuare profili morfologici o sezioni, oppure effettuare calcoli di lunghezze reali (ad esempio, la lunghezza vera di una strada considerando anche l'andamento altimetrico, e non quella proiettata su di una superficie piana come nella rappresentazione cartografica bidimensionale). La crescente disponibilità di informazioni sul territorio, tra cui quelle relative alla morfologia, rendono maggiormente fruibili le funzioni che operano sui dati tridimensionali, aprendo la strada a delle analisi, assai sofisticate, che erano prima appannaggio di sistemi specializzati di sola modellazione tridimensionale.

#### 4.3.5 *L'interfaccia utente e la programmabilità*

Tutte le funzionalità sopra descritte, per quanto potenti possano essere, troverebbero una forte limitazione nel loro utilizzo se non ci fosse una facile e adeguata modalità di interazione tra l'uomo e la macchina in grado di svolgerle. Analogamente, spesso il risultato di un'analisi o di una modellazione si ottiene effettuando le stesse operazioni in maniera iterativa su diversi set di dati, oppure modificando dei parametri e reiterando l'analisi. La disponibilità di un linguaggio di programmazione e di adeguati strumenti di interazione con l'utente sono la risposta a queste esigenze. Mediante un linguaggio di programmazione di alto livello, dotato di strutture di controllo del flusso delle operazioni e di comandi per la realizzazione di maschere e menù, è possibile realizzare sofisticate interfacce, che rendono agevole anche ad un operatore non specializzato l'accesso e la manipolazione dei dati. La diffusione di standard internazionali per quanto riguarda le GUI (Graphical User Interfaces), come X-Windows, ha di fatto unificato le modalità di sviluppo delle interfacce, rendendo agevole la loro realizzazione e il loro scambio tra macchine anche di diversi costruttori. Una ulteriore sofisticazione, di grande utilità in sede di definizione ed implementazione di una interfaccia, è la disponibilità di editor grafici interattivi, mediante i quali possono essere costruiti dall'utente dei menù dotati di tutti i widgets tipici di queste GUI: cursori, bottoni di scelta, scroll-list ecc. sono alla portata anche del programmatore casuale, che viene sgravato dalla necessità di conoscere comandi complessi e può quindi concentrarsi sulle problematiche dell'applicazione a cui sta lavorando.

#### 4.4 **Scelta del software**

I software GIS utilizzati per la costruzione della Carta di Vulnerabilità sono stati ARC/INFO Release. 7.x ed ARCVIEW 3.x prodotti dalla ESRI<sup>16</sup>. Diversi sono i moduli che compongono questo GIS, tra questi di fondamentale importanza, per il tipo di elaborazione necessaria per la

redazione delle Carte di Vulnerabilità, sono il modulo GRID di ARCINFO e l'estensione Spatial Analyst di ARCVIEW. In questo modulo il set di dati è costituito da griglie ed ognuna di esse si può considerare come l'equivalente di una copertura ARCINFO o uno shapefile di ARCVIEW. Ogni griglia rappresenta una variabile spaziale. Mentre le coverages sono memorizzate come una serie di coordinate x, y, le celle delle griglie sono memorizzate come righe e colonne. La cella è l'entità primaria di una griglia. Ogni cella è quadrata, ha la stessa dimensione di tutte le altre celle della griglia e contiene un valore numerico che rappresenta il valore assunto dalla variabile spaziale in quella cella. I valori delle celle possono essere numeri interi a 32 bit oppure numeri reali (floating point). Il sistema di coordinate di una griglia è lo stesso di qualsiasi altro set di dati geografici. Le righe e le colonne sono parallele agli assi coordinati; la posizione e l'area di ogni cella è facilmente determinata dalle sue righe e colonne. Il sistema di coordinate di una griglia è, quindi, definito dalla dimensione della cella, dal numero di righe e colonne, dalle coordinate x e y dell'angolo in alto a sinistra. Sia Spatial Analyst che GRID forniscono un'ampia scorta di strumenti per l'analisi spaziale. Si possono facilmente elaborare e manipolare i dati geografici con modelli di dati raster. Entrambi questi moduli hanno almeno tre distinti vantaggi nella modellazione:

- Il processamento delle griglie è veloce. Nelle operazioni di overlay vengono caricati subito i dati di altre griglie su una griglia di base. Di contro, l'operazione di overlay poligonale per coperture vettoriali, in cui gli archi di una copertura possono essere intersecati dagli archi di un'altra copertura, è piuttosto complessa.
- Le griglie possono rappresentare in maniera continua le variazioni spaziali di un fenomeno come l'elevazione, la distanza tra due particolari zone caratteristiche, la riflettanza spettrale, ecc. Concettualmente, le celle rappresentano un esempio di superficie continua. Per esempio, i biologi che studiano gli animali selvatici modellano l'habitat dei cervi sapendo che la distanza dall'acqua, il tipo di cibo ed i nascondigli sono fattori critici per il loro habitat. Tuttavia non è facile trovare tutti e tre i fattori in un unico posto. La convenienza di ogni luogo dipende da un valore adeguato della sua distanza da questi tre requisiti di vita; il più vicino è il migliore. Applicando semplicemente la distanza pesata e sviluppando funzioni sui dati in griglie, i biologi possono misurare il numero di celle per ciascun requisito vitale per ogni cella nell'area di studio. Infatti, essi possono determinare facilmente quante celle dei vari requisiti vitali sono comprese all'interno di una distanza fissa dalla tana per ogni cella.
- Le celle sono molto utili anche nelle operazioni analitiche che non possono essere fatte su coperture contenenti dati vettoriali. Per esempio, le griglie possono essere usate per elaborare modelli di flusso delle acque sotterranee attraverso una formazione rocciosa, o la propagazione di un incendio attraverso una superficie di predisposizione all'incendio, dove per "predisposizione all'incendio" si intende l'insieme dei valori rispettivamente del legname da combustione, la direzione del vento, il contenuto di umidità e l'esposizione di ogni cella.

Gli attributi delle celle di una griglia sono memorizzati in una tabella di valori degli attributi (VAT). Le VAT contengono sempre almeno due items: VALUE e COUNT, questi indicano rispettivamente il valore assunto dalle celle nella griglia, ed il numero totale delle celle con lo stesso valore.

**Tabella 4.1 - Esempio di Value Attribute Table**

VALUE	COUNT
20	112
25	235
30	127

In questo esempio, nella griglia in esame ci saranno 112 celle con valore 20, 235 celle con valore 25, 127 celle con valore 30, ecc.. Vi è un solo record per una griglia le cui celle hanno tutte lo stesso valore. Possono essere aggiunti nuovi campi alle VAT. Altre tabelle possono essere relazionate usando gli stessi metodi utilizzati per le altre tabelle di attributi.

Le VAT sono differenti dalle altre tabelle di attributi perché contengono il valore delle celle, ma non il valore di una specifica cella. Infatti, a differenza delle coperture a cui è associata una tabella di default che contiene alcuni campi (items) di sistema tra cui il campo "ID#" che permette di identificare univocamente ogni punto di una copertura puntuale, ogni arco di una copertura lineare ed ogni poligono di una copertura poligonale, nelle VAT non vi è un "ID#" caratteristico di una cella.

Tutti i formati creati con altri moduli di ARC/INFO possono essere convertiti in griglie, ad esempio i TIN, le coperture, le immagini, ecc.

Questo permette l'applicazione di griglie a maglia definibile dall'utente su qualsiasi copertura, ottenendone una rasterizzazione (discretizzazione territoriale). L'informazione associata a ciascuna cella della griglia è ricavata dall'elemento (punto, area, arco) della coverage che ricade nell'area di ricopertura della stessa. Nel caso in cui più elementi ricadano nella cella, di default viene attribuito ad essa l'elemento di maggior area. La maglia, dunque, è sempre scelta in relazione alla scala di acquisizione dei dati.

E' possibile fare delle analisi utilizzando le distanze euclidee oppure le distanze pesate. Queste ultime sono utilissime nelle analisi di percorso, ad esempio non sempre il percorso più breve è il meno costoso (meglio una galleria di 10 chilometri nei basalti che una di 2 nelle argille).

La possibilità di inserire come attributo di ogni cella il valore della z (floating point) permette di calcolare le pendenze (SLOPE), l'aspetto (ASPECT), l'illuminazione (HILLSHADE) di una certa superficie rispetto ad una sorgente luminosa variamente orientata. Fare analisi di visibilità, ad esempio, affinché i guardaparco possano tenere sotto controllo tutto il bosco, determinare dove devono essere costruite le torri di controllo affinché sia coperto da ogni torre un certo spazio visibile.

## 4.5 Metodi di vulnerabilità e GIS

### 4.5.1 Metodo naturale

Come già detto precedentemente, questo metodo si basa sull'identificazione delle situazioni idrogeologiche collegate ai complessi idrogeologici.

Lo strumento GIS di base, per far ciò è più che sufficiente, infatti si opererà su poligoni ad ognuno dei quali verrà assegnato un valore di vulnerabilità, funzione della situazione idrogeologica caratteristica del poligono analizzato.

Verrà quindi costruito un tema poligonale con associata la sua tabella di identificativi di situazioni idrogeologiche, cioè ad ogni poligono verrà assegnata con un codice o in maniera descrittiva la sua situazione idrogeologica.

Ancora più semplice risulta la restituzione cartografica e la presentazione del prodotto finito.

Tutte le cartografie che è possibile integrare con la Carta di vulnerabilità intrinseca, ossia la geometria e l'idrodinamica dei corpi idrici, lo stato di inquinamento degli acquiferi, possono facilmente essere implementati come coperture lineari o poligonali.

I CDP, i potenziali ingestori e viacoli di inquinamento, i preventori e riduttori di inquinamento, i principali soggetti a rischio, possono essere implementati come coperture puntuali, per questi è già stata pubblicata la legenda informatizzata per GIS ArcView (Civita e De Maio, 2000).

#### 4.5.2 Metodo sintacs

L'applicazione del metodo SINTACS data la necessità, espressamente manifestata dall'Autore di mantenere il controllo dell'operatore sul singolo valore da attribuire alla cella, è stato sviluppato integrando un foglio di calcolo di uso comune (Excel) e il modulo di gestione discretizzata del territorio di uno dei più comuni pacchetti GIS (Spatial Analyst di ArcView). Tutto questo è stato messo a punto nella Release 5 di SINTACS pubblicata da Civita e De Maio nel 2000 in cui è accluso il CD con il software applicativo. Sull'esperienza di altri metodi a sistema misto computerizzato, il territorio viene discretizzato con una griglia a maglie regolari al fine di utilizzare forme semplificate di gestione dei dati territoriali. Il territorio, per universalità del sistema e per uniformità della rappresentazione cartografica (in genere in scala operativa 1:50000), viene suddiviso in Elementi Finiti Quadrati (EFQ) con lato di 0,5 km ai quali vengono assegnati i punteggi dei singoli parametri ed i diversi valori delle cinque linee di pesi che interpretano altrettanti scenari idrogeologici e di impatto. La dimensione della cella elementare può variare in funzione delle diverse esigenze dell'utente, generalmente legate a tre fattori fondamentali:

- densità dei punti di rilevamento per unità di superficie;
- numero di informazioni ottenibili per ciascun punto;
- denominatore di scala alla quale si intende realizzare la Carta finale.

In pratica, fatte le considerazioni del caso, è necessario applicare alla cartografia di base dell'area una griglia a maglie regolari referenziata nella quale le coordinate delle celle devono essere alfanumeriche la prima di esse indica la colonna, la seconda la riga (A1, B2, C3, ecc.), in modo da costruire una griglia con colonne distinte da lettere e righe distinte da numeri. Ciò è dettato dalla necessità del programma di operare per colonne e righe. Tali coordinate vanno riportate sulla prima colonna ("CELLA") della scheda riassuntiva. In funzione della forma dell'area, la griglia potrà contenere delle celle vuote che andranno comunque referenziate, ma, ovviamente, non dovranno essere inserite nella scheda e successivamente nel programma di calcolo.

#### 4.6 Raccolta, catalogazione e Calcolo dei parametri di input

Per ogni cella è necessario raccogliere, selezionare, in certi casi preelaborare i dati necessari per calcolare i valori dei vari parametri e/o per territorializzare dati puntuali (sezioni idrogeologiche, estrapolazione delle piezometriche per aree a forte soggiacenza, dello spessore insaturo e saturo, suoli, ecc.).

Una volta raccolti i dati grezzi e convertiti in punteggi SINTACS, per una ottimizzazione della gestione delle informazioni acquisite e per una migliore visione d'insieme, è utile schematizzare in schede di lavoro (su carta) i valori dei parametri per ogni cella discretizzata secondo la scheda riportata in fig. 4.1.

Figura 4.1 - Scheda di lavoro.

Cella	S	I	N	T	A	C	S	Pesi



Operativamente, l'applicazione del Metodo SINTACS si articola, inizialmente, nella preparazione di:

- 7 cartografie tematiche, una per ogni singolo parametro previsto dal metodo alle quali deve aggiungersene una dedicata alla discretizzazione delle caratteristiche idrogeologiche e di impatto (linee di pesi);
- trasformare le suddette pre-elaborazioni nelle corrispondenti Carte dei punteggi, adoperando grafici e tabelle insiti nella metodologia;
- operare cella per cella, moltiplicando i punteggi per i pesi costituenti la stringa di pesi corrispondente;
- ottenere l'indice SINTACS, per sommatoria dei prodotti;
- calcolare l'indice SINTACS normalizzato;
- attribuire ad ogni cella dei codici di colore per realizzare sia la Carta di Vulnerabilità che le singole Carte parametriche.

Come si può intuire, essendo l'applicazione del metodo di tipo cell by cell si basa sull'esecuzione di calcoli semplici, ma ripetitivi. Si vuole qui creare una procedura per diminuire l'onere di chi vuole analizzare la vulnerabilità di un'area, ciò significa individuare un criterio di automatizzazione tanto più efficace quanto più risulta semplice.

Gli strumenti messi a disposizione dall'attuale tecnologia informatica per raggiungere tale scopo possono essere molteplici. Infatti sofisticati strumenti GIS, con altrettante complesse piattaforme hardware, potrebbero essere un valido supporto soprattutto per la vulnerabilità integrata (Civita, 1990; 1994) soddisfacendo il bisogno di aggiornamento dei dati relativi ai CDP. L'elevato costo di sistemi così complessi e la competenza specialistica necessaria, però, sarebbero, da un lato, eccessivi per le semplici funzioni richieste per l'indicizzazione della vulnerabilità intrinseca e, dall'altro, un ulteriore ostacolo al diffuso utilizzo dell'applicazione del metodo stesso che fornisce un efficace strumento di previsione e prevenzione del pericolo di inquinamento.

Come descritto in precedenza, base del metodo è la discretizzazione dell'area per maglie, il calcolo per ciascuna di esse dei vari parametri, e la rappresentazione grafica dei risultati. Lo strumento informatico più semplice per l'esecuzione di tali calcoli è un foglio elettronico poiché. Esso coniuga le esigenze di calcolo richieste dal metodo con la grande diffusione e la semplicità di utilizzo anche da parte di utenti con conoscenze informatiche di base.

Il software Microsoft Excel è, attualmente, il foglio elettronico più diffuso ed offre, oltre ai vantaggi di un foglio di calcolo, anche quelli di un linguaggio di programmazione di tipo visivo, Visual Basic for Applications (VBA). Tale software è costituito da oggetti, caratterizzati da proprietà, che possono essere programmati o controllati attraverso VBA; tra questi, i più importanti sono: l'Applicazione, la Cartella, il Foglio di lavoro, la Cella. Ad esempio, si possono attribuire alle proprietà delle Celle valori contenuti in un Foglio di lavoro o in una Cartella distinti.

Grazie a questi strumenti, è stato realizzato un sistema informativo organizzato con la logica tipica del foglio di calcolo. Vengono destinate le prime 9 colonne del foglio all'introduzione dei dati (coordinate della maglia, punteggi SINTACS, pesi). Le successive colonne vengono destinate al calcolo dei parametri SI, II, NI, TI, AI, CI, SI, alla loro somma ed all'individuazione della classe di vulnerabilità, funzione dell'indice SINTACS, della singola maglia in esame.

Grazie alla possibilità che Excel rende disponibile, di dimensionare le celle come quadrati e di applicarvi un codice colore è possibile anche una efficace rappresentazione grafica dei risultati ottenendo così delle vere e proprie Carte della vulnerabilità con le relative Carte parametriche.

dati costruendo delle Carte in cui le maglie sono costituite dalle celle di Excel, poiché la dimensione massima del foglio è di 16 384 righe e 256 colonne nel caso di Excel 95 che diventano 65 536 righe e 256 colonne in Excel 97. Anche il numero di colori utilizzabili in una cartella è limitato a 56. Quindi, nel caso si volesse rappresentare più carte su fogli diversi di una stessa cartella, occorrerà scegliere i codici di colore tenendo ben conto di questo limite.

L'area effettivamente trattabile viene ulteriormente ristretta dal naturale utilizzo del foglio elettronico. Infatti, volendo mantenere un approccio semplice di elaborazione dei dati, destinando una riga ad ogni maglia essendo limitato il numero di righe, sarà possibile trattare al massimo 16383 maglie in Excel 97 e 65535 maglie in Excel 97.

Pur essendo evidenti, dunque, i limiti del software, esso risulta più che sufficiente per un elevatissimo numero di casi pratici e comunque tanto ampio da non compromettere una visione d'insieme dell'area di quasi tutti i Comuni italiani.

Sarà compito dell'utente introdurre le coordinate della cella, i parametri SINTACS ed il peso da assegnare alla cella. La procedura, effettuati i calcoli di SI, II, NI, TI, AI, CI, SI e della loro somma assegna alla cella la classe di vulnerabilità e ne effettua la rispettiva colorazione nei singoli Fogli di lavoro previsti dalla procedura (Generale, Pesì, S, I, N, T, A, C, X) (fig. 4.2).

**Figura 4.2 - Esempio di Foglio di calcolo. (Work sheet)**

COORD.	S	I	N	T	A	C	X	PESI	SI	II	NI	TI	AI	CI	XI	SOMMA	CLASSE
A17	10	7	2	4	3	6	10	IN	50	28	10	12	9	18	30	55	A
A18	10	7	2	5	3	6	10	IN	50	28	10	15	9	18	30	57	A
A19	10	6	8	5	8	5	10	IN	50	24	40	15	24	15	30	73	E
A20	10	7	2	4	8	5	10	IN	50	28	10	12	24	15	30	61	A
B17	10	9	3	3	7	7	10	IN	50	36	15	9	21	21	30	66	A
B18	10	6	8	5	8	7	10	IN	50	24	40	15	24	21	30	76	E
B19	10	6	2	4	8	5	10	IN	50	24	10	12	24	15	30	59	A
c1	9	4	9	5	7	5	10	IN	45	16	45	15	21	15	30	68	A
c2	9	4	9	5	7	5	10	IN	45	16	45	15	21	15	30	68	A
C17	10	9	3	3	7	5	9	IN	50	36	15	9	21	15	27	62	A
C18	9	6	8	5	8	7	9	DR	45	30	32	25	24	14	18	69	A
C19	9	9	2	4	7	5	10	IN	45	36	10	12	21	15	30	61	A
d1	9	4	8	5	7	5	10	IN	45	16	40	15	21	15	30	66	A
d2	9	4	8	5	7	5	10	IN	45	16	40	15	21	15	30	66	A
d3	9	4	8	5	8	5	10	IN	45	16	40	15	24	15	30	67	A

## 4.7 Automatizzazione del calcolo e della rappresentazione grafica

Si riporta di seguito una sintetica descrizione delle routine di automatizzazione del calcolo. La descrizione si riferisce all'implementazione per le versioni di Excel.x che utilizzano VBA come linguaggio di programmazione.

### 4.7.1 Il Main Program: procedura sintacs

Illustrate nei paragrafi precedenti le potenzialità del software di base, viene qui illustrata brevemente la procedura realizzata per l'automatizzazione del metodo SINTACS e la costruzione della relativa cartografia.

Si costruisce una prima procedura con i seguenti compiti:

- avviare la prima iterazione;
- verificare che la riga su cui opera non è vuota;
- fare eseguire tutte le operazioni di calcolo e di rappresentazione grafica prevista per la prima area;
- rendere attiva la cella dell'iterazione successiva;

- ripetere le iterazioni finché non si riscontra una riga vuota;
- terminare il programma qualora trovi una riga vuota.

#### 4.7.2 La procedura calcola

Altro supporto esterno cui fa ricorso la procedura esecuzione è un'altra procedura che effettua il calcolo dei parametri SI, II, NI, TI, AI, CI, XI. Si costruisce detta procedura assegnandole il nome calcola.

Alla procedura calcola viene passato il vettore punteggi in cui vengono memorizzati i punteggi SINTACS. La procedura alloca i valori calcolati nelle celle del foglio di calcolo destinati ai parametri stessi. Una sottoprocedura, associata ad una variabile contatore, consente di selezionare, di volta in volta, l'elemento del vettore punteggi di interesse, di effettuare il calcolo memorizzandolo nella cella attiva e passare a quella successiva.

#### 4.7.3 La procedura esecuzione

Come già accennato, questa procedura costituisce il cuore del programma. Quando è richiamata dal main program, essa effettua le seguenti azioni:

- calcola il vettore punteggi dei punteggi SINTACS tramite la procedura parametri;
- effettua il calcolo dei parametri SI, II, NI, TI, AI, CI, XI passando il vettore punteggi alla procedura calcola;
- effettua la somma dei parametri SI, II, NI, TI, AI, CI, XI normalizzandola nell'intervallo [0,100] e la memorizza nell'apposita cella;
- assegna all'area della griglia che si sta processando la classe SINTACS; la struttura di controllo visualizza un messaggio di errore, qualora la somma normalizzata risulti esterna all'intervallo prima menzionato, fornendo il numero della riga in cui si è riscontrato l'errore; in tal caso la procedura viene bloccata;
- se la classe dell'area è individuata correttamente, viene attivata la procedura colora per la rappresentazione grafica dei dati di interesse.

#### 4.7.4 La procedura colora

La procedura ha il compito di costruire tutte le cartografie derivanti dall'applicazione del metodo, viene passato alla procedura il **vettore\_colori** costruito nel main program.

Vengono attivati ordinatamente i Fogli di lavoro su cui vengono realizzate le singole Carte (Generale, Pesì, S, I, N, T, A, C, X), avendo l'informazione delle coordinate della cella che viene processata nella singola iterazione, attribuisce per ogni Carta il colore relativo al parametro calcolato.

A questo punto è facile constatare come nei singoli Fogli di lavoro siano state realizzate tutte le Carte previste.

Con Excel è possibile stamparle in un formato massimo largo 356 mm e lungo 215 mm. E' chiaro che, per una restituzione in formato congruente alla cartografia di base e di restituzione definitiva sarà possibile trasformare i dati in un formato intermedio (DIF), gestito da vari software di grafica. Georeferenziando in questo la griglia di discretizzazione dell'area in studio, sarà possibile restituire la Carte anche sovrapponendole via computer su una base topografica raster, formato ormai gestito da vari software CAD.

#### 4.7.5 *Trasferimento dati su sistemi GIS*

Una nuova funzione della release 5 permette l'esportazione delle griglie ottenute con il calcolo SINTACS, in un formato congruente con ArcView. In tal modo, ogni singola Carta monoparametrica, nonché la Carta di vulnerabilità, diventano griglie rielaborabili all'interno di una analisi GIS. Sarà, inoltre, possibile restituire una cartografia ben confezionata, georeferenziata in coordinate reali (Gauss Boaga, UTM, Cassini Soldner, etc.), con cartografia di base raster o vettoriale, pronta per la riproduzione, in scala reale, su supporti cartacei anche mediante stampanti di grande formato.

Il software sviluppato per applicare il metodo SINTACS (Civita e De Maio, 2000) permette, quindi, di coniugare la necessità di mantenere il controllo sulla singola cella, con quella di avere una restituzione ed una potenzialità di analisi territoriale oggi permesse solo da software GIS.





## 5. Uso delle carte di vulnerabilità

### 5.1 Obiettivi della cartografia di vulnerabilità

Gli scopi delle Carte, identificati sin dall'inizio dell'attività del GNDICI ed elencati in AA.VV. (1988) erano, tra gli altri:

- fornire precisi obiettivi agli interventi di prevenzione e di protezione attuabili mediante il sistema normativo esistente o con l'introduzione di nuovi vincoli specifici (Piani Regolatori Generali, Piani di Bacino, ecc.);
- fornire precise indicazioni al pianificatore circa la localizzazione di nuove concentrazioni urbane ed industriali, di impianti di discarica, di opere di captazione, ecc.

Dal 1985 ad oggi, sono diversi i casi di corretto e consapevole recepimento dei criteri di protezione delle risorse idriche sotterranee (ris), che sono ricavabili dalle Carte di vulnerabilità, nelle norme di pianificazione adottate ai vari livelli istituzionali. A titolo d'esempio, si possono citare le norme sull'utilizzazione agronomica dei liquami zootecnici in vigore, da diversi anni, nella Regione Emilia Romagna (L.R. 42/86 e L.R. 50/95); e l'immissione della cartografia della vulnerabilità nel PRG della Provincia di Livorno, dopo averne completato la copertura totale. Dall'Umbria al Veneto, dal Friuli alla Sicilia, l'utilizzazione delle Carte da parte di diversi livelli di Agenzie pubbliche è da tempo consolidato.

Una serie di normative europee e nazionali di recente emanazione fa, invece, esplicito riferimento al concetto di vulnerabilità senza, tuttavia, definirne in modo completo i contenuti. Appare, pertanto, indispensabile che, con lo stesso criterio che ha portato a stilare la legenda per le Carte di vulnerabilità (acquisita in sede internazionale – Vrba & Zaporozec, 1995) o a definire i metodi di delimitazione delle aree di salvaguardia delle captazioni di acque destinate al consumo umano (AA.VV., 1988), si giunga quanto prima ad una discussione approfondita che porti alla stesura delle linee-guida per l'uso delle Carte di vulnerabilità per la pianificazione e gestione del territorio. Ciò al fine di giungere ad una metodologia unificata per la redazione delle Carte e di tradurre in termini tecnico - amministrativi le indicazioni ottenibili dalle Carte stesse. In tal modo, questo tipo di documento dovrà assurgere al ruolo di elevato profilo, pratico ed immediato, nella tutela dei beni ambientali per il quale è stato progettato.

Nella realtà fisiografica, infrastrutturale e insediativa di molte aree italiane, la scelta di piano a tutela delle acque sotterranee destinate al consumo umano non è più rimandabile.

Dalle aree di pianura, da quelle intensamente trasformate e/o turisticizzate vengono, già da anni, segnali incontrovertibili di degrado annunciato qualora non s'intervenga, sia in termini di difesa di punto, sia di difesa a tutto territorio (Civita, 1992).

Infatti, se le acque superficiali rispondono in tempi relativamente rapidi ad interventi di ripristino e tutela, a seguito di misure e di controlli sugli scarichi di reflui o, ad esempio, con impianti di depurazione, i tempi di risposta delle acque sotterranee sono assai lunghi: invertire la tendenza al depauperamento della risorsa comporta tempi che superano l'intervallo di uno o due decenni, e per alcune realtà geologiche questo tempo può essere anche maggiore. Le politiche di preservazione della risorsa nel tempo non può che prevedere tempi di risposta estremamente lunghi.

Si desume, pertanto, che nel contesto ambientale nazionale la risorsa idrica sotterranea è una risorsa strategica per le potenzialità intrinseche di disponibilità. La sua tutela è sempre più consolidata anche grazie ad interventi legislativi, come la L. 36/1994, che riconoscono alle risorse qualitativamente pregiate una prioritaria attenzione di salvaguardia, di destinazione pubblica e di tutela in ottica di sostenibilità per le generazioni future.

Il mantenimento della risorsa deve mettere in gioco azioni di tutela attiva nei confronti dei fattori di pressione, che producono emissioni in suolo, in acque superficiali e, indirettamente,

in acque sotterranee. Tali tutele non sono, ovviamente, omogenee sul territorio nazionale, né a scala locale, in quanto la vulnerabilità del sistema naturale è variabile nello spazio e nel tempo.

Nel processo che intercorre tra i cdp e le risorse idriche sotterranee, particolare attenzione deve essere dedicata alla definizione delle sorgenti di contaminazione, ai loro veicoli e ai bersagli.

Se la sorgente è da riferirsi a un'attività industriale, ad un'attività agricola con elevato rilascio di reflui, oppure infine a un'attività di trattamento o stoccaggio di rifiuti o anche prodotti di varia natura e composizione, il bersaglio è altrettanto facilmente associato a un punto di prelievo idrico di acque di falda, a una risorsa di qualità pregiata, a una popolazione, adulta e non, di utenti di un servizio acquedottistico, la definizione dei veicoli può essere di maggiore difficoltà. Sono veicoli in particolare i luoghi ove si verifica il transfert di contaminazione tra le aree sorgente e i prelievi, gli acquiferi (in particolare quelli superficiali), i pozzi abbandonati, eventuali corsi d'acqua e/o reti fognarie.

Come si osserva in Tabella 5.1, l'attività legislativa italiana si attiva prevalentemente nel controllo dei punti sorgente di emissione, mentre è di più recente sviluppo un corpo normativo sulla tutela delle acque, in particolare rappresentato dal D.Lgs. 152/99 e D.Lgs. 258/00, che regola tra l'altro il controllo delle acque sotterranee (veicoli) e i bersagli: esso introduce la necessità di stabilire gli obiettivi di qualità per i corpi idrici, affronta in modo specifico gli obblighi di monitoraggio delle risorse idriche sotterranee, stabilisce i criteri per la definizione delle aree sensibili da parte delle Regioni e, riprendendo e modificando il DPR 236/88, affida infine alle Regioni e alle Autorità d'Ambito il compito di individuare le aree di salvaguardia delle opere di captazione di acque ad uso potabile, in particolare pozzi e sorgenti.

Poiché oltre l'80% delle acque ad uso potabile in Italia proviene da acque sotterranee, ne consegue che si dovrà sviluppare un'attività di monitoraggio dei corpi idrici sotterranei, come già attivato da alcune regioni da alcuni anni (si veda a proposito il Progetto Interregionale di Sorveglianza e Monitoraggio delle Acque Sotterranee, PRISMAS, nell'ambito del programma SINA). In modo analogo, occorre provvedere ad individuare le aree di salvaguardia dei punti di prelievo dei pozzi e sorgenti ad uso civile (distinte in zone di tutela assoluta e zone di rispetto e zone di protezione), auspicando la definizione di criteri generali per la perimetrazione e per gli interventi di protezione dinamica dei pozzi.

Ciò comporta la necessità di un'informazione completa, corretta, organizzata e georeferenziata, in una parola l'utilizzazione di una cartografia della vulnerabilità opportunamente preparata e facilmente utilizzabile in ambito istituzionale e professionale.

Nella sua forma tradizionale, una Carta della vulnerabilità intrinseca offre uno scenario statico che territorializza la suscettibilità specifica dei sistemi acquiferi ad ingerire e diffondere, anche mitigandone gli effetti, un'inquinante idroveicolato tale da produrre impatto sulla qualità delle acque sotterranee nello spazio e nel tempo (Civita, 1987).

La cartografia di vulnerabilità si pone pertanto l'obiettivo di riduzione del rischio d'esposizione dei bersagli, quali il sistema ambientale destinato alle generazioni future e la popolazione direttamente esposta, in connessione con le attività di monitoraggio delle risorse e in funzione con l'ottenimento degli obiettivi di qualità dei corpi idrici definiti dal D.Lgs. 152/99.

Quando questa territorializzazione viene integrata con il censimento di tutte le attività impattanti (centri di pericolo), dei soggetti di impatto (punti di accesso agli acquiferi – soggetti a rischio), dei mitigatori di inquinamento (centri di depurazione, stoccaggio controllato, ecc), la Carta di vulnerabilità diviene uno strumento di previsione (di impatti ma anche di mitigazione degli inquinamenti). Attraverso la pianificazione (preventiva e/o correttiva), essa diventa, finalmente uno strumento di prevenzione.

## 5.2 Evoluzione del quadro normativo italiano

### 5.2.1 Principali modifiche del quadro normativo vigente

L'evoluzione normativa che ha caratterizzato l'ultimo decennio in Italia, in adeguamento alle successive direttive europee in materia ambientale, ha portato a un progressivo arricchimento nell'attività della pubblica amministrazione e, per quanto attiene i privati, a un maggior rispetto e una maggiore attenzione a requisiti ambientali.

Il dettaglio normativo inerente le tematiche di vulnerabilità e rischio per le acque sotterranee è cresciuto in modo cospicuo in pochissimi anni in riferimento alle tematiche – ad esempio – dei siti contaminati, ora assai rilevante data la trasformazione della società da industriale a postindustriale; l'innovazione normativa del D.Lgs. 22/1997 (Attuazione delle direttive 91/156/CEE sui rifiuti, 91/689/CEE sui rifiuti pericolosi e 94/62/CE sugli imballaggi e sui rifiuti di imballaggio), corredato dal DM 471/1999 (applicativo dell'art.17 comma 1), porta all'introduzione del concetto di “gestione del rischio” ambientale, alla verifica della “contaminazione sopportabile” dal sistema, fino all'ordine di priorità – da stabilirsi secondo la gravità del rischio - delle bonifiche da eseguire e finanziare : tutti gli elementi citati sono da porre in stretta relazione con la componente delle acque sotterranee e con gli elementi di vulnerabilità del territorio.

Risulta cresciuto secondo tempi più lenti, contestualmente ad un'attività di subdelega alle legislazioni regionali, l'apparato normativo relativo alle procedure di VIA.

All'interno della procedura prevista, il soggetto proponente, pubblico o privato, tenuto alla presentazione di uno studio di impatto ambientale, svolge una operazione di presa di responsabilità degli impatti sul sistema ambientale che la propria opera esegue, sia essa un impianto produttivo, un impianto di rifiuti, una infrastruttura. Pur col rischio che tali dichiarazioni siano meramente a giustificazione dell'opera, o che non prevedano correttamente gli impatti futuri, si presume che le proposte di mitigazioni, di compensazioni e di piani di monitoraggio, che provengono anche da una verifica del valutatore, soggetto pubblico, permettano di meglio valutare i rapporti tra opera e sistema ambientale. In altri termini, è il soggetto proponente, spesso privato o comunque privato a partecipazione pubblica, che si assume in prima persona oneri di approfondimenti, valutazioni e controlli. Ne deriva che, con la procedura della VIA, si possa innescare un processo virtuoso di collaborazione tra pubblico e privato per la conoscenza del sistema ambientale e per interventi di tutela. Anche in questo caso, le ipotesi di impatto e le verifiche di compatibilità trovano supporto da strumenti tecnici, anche cartografici, per l'indicazione della vulnerabilità delle risorse idriche sotterranee.

Un passaggio di competenze in materia pianificatoria ed ambientale degli organismi centrali verso gli enti locali ha avuto luogo grazie a progressive leggi dal 1977 al 1998 (DPR 616/1977, D.Lgs. 112/1998); il quadro normativo prodotto dalle regioni è pertanto differente da caso a caso e su materie quali l'attività estrattiva e la coltivazione di miniere, la procedura di VIA e la stessa gestione del servizio idrico vi è un più o meno marcato adattamento alle condizioni locali, tale da non permettere di poter stendere un quadro omogeneo a livello nazionale, per alcune materie, tra vulnerabilità degli acquiferi e il quadro normativo vigente.

Al contrario, un elemento che fornisce uniformità nelle relazioni tra normative e vulnerabilità è fornito dall'emanazione di testi unici in materia ambientale, come il già citato D.Lgs. 22/1997 e, soprattutto, i D.Lgs. 152/1999 e D.Lgs. 258/2000 (“Disposizioni sulla tutela delle acque dall'inquinamento e recepimento della direttiva 91/271/CEE concernente il trattamento delle acque reflue urbane e della direttiva 91/676/CEE relativa alla protezione delle acque dall'inquinamento provocato dai nitrati provenienti da fonti agricole”). Questi ultimi accorpano e rivisitano precedenti testi inerenti la tutela e la gestione delle acque, quali la L. 319/1976, il D.Lgs. 132/92 e 133/1992, il DPR 236/1988.



In tal modo la materia di tutela delle risorse, gli obiettivi di risanamento e di monitoraggio dell'intero sistema acquifero sono più organicamente legati alle attività autorizzative e di controllo degli scarichi, dei reflui agricoli, della depurazione.

Infine, la pianificazione di bacino, pur faticando a trovare una sua relazione con i contenuti pianificatori degli enti territoriali, comunali e provinciali, è fortemente connessa alle esigenze di tutela emerse a causa degli eventi di danno ambientale sul sistema delle acque sotterranee. Come si vedrà più in dettaglio in seguito, il piano di bacino ha valore di piano territoriale di settore (coordinato con i piani di tutela delle acque di cui al D.Lgs. 152/1999) ed è lo strumento conoscitivo nel quale sono pianificate e programmate le azioni e le norme d'uso finalizzate alla conservazione, alla difesa, alla valorizzazione e la corretta utilizzazione del suolo e delle acque, sulla base delle caratteristiche fisiche ed ambientali del territorio interessato. La vulnerabilità territoriale rappresenta una fase di analisi fondamentale per la stesura di un progetto di piano, ai sensi della 183/1989.

Ne consegue che il rapporto tra le pressioni antropiche e le risorse naturali trovano un sempre maggiore aggancio con percorsi di pianificazione, progettazione, risanamento e monitoraggio, all'interno di processi normativi di recente emanazione. Tali processi normativi coinvolgono una varietà di soggetti che insistono nello stesso territorio (Enti Pubblici, ARPA, ANPA, Autorità di Bacino) portatori di comuni interessi di tutela ambientale: questo è il contesto nel quale si colloca la cartografia di vulnerabilità idrogeologica.

### 5.2.2 *Urgenza di strumenti di tutela*

Alla rapidità evolutiva del quadro normativo non segue altrettanto rapidamente l'applicazione di strumenti di tutela e di salvaguardia delle risorse idriche sotterranee. Qualora si intenda procedere con interventi di salvaguardia, esiste sempre la possibilità di una valutazione, anche preliminare e limitata a pochi parametri, in modo da rendere immediatamente disponibili i criteri di protezione informatori della pianificazione territoriale e non fare intervenire i guasti che si potrebbero produrre nei tempi più lunghi che servono sovente per ottenere una valutazione più approfondita. Si è, infatti, preconizzato che valutazioni sorrette da pochi dati siano spesso approssimate per eccesso e dunque, indicherebbero cautele sufficienti per una protezione più che efficace (Vrana, 1984). Ciò consente, in ogni modo, di acquisire i dati necessari all'approfondimento e di aggiornarli continuamente, in modo che il processo di pianificazione diventi interattivo attraverso successive implementazioni degli strumenti di governo.

Non si può sottacere che, così operando, si potrebbero verificare situazioni di disomogeneità, tuttavia ineluttabili, che costituiscono il prezzo da pagare per realizzare, il più rapidamente possibile, la tutela delle risorse. In caso contrario, si rischierebbe di predisporre uno strumento di notevole perfezione, disponibile per la tutela di risorse ormai definitivamente pregiudicate. Pertanto, è lecito ritenere che il processo di pianificazione possa essere realizzato, anche in sede locale, partendo da una definizione di tipo anche solo schematico (p.e. a scala di bacino o di regione) della vulnerabilità degli acquiferi con norme cogenti da tenersi valide in salvaguardia fino a quando non si disponga di definizioni dettagliate e, dunque, operative. Ne consegue che tra i diversi metodi di valutazione della vulnerabilità intrinseca degli acquiferi all'inquinamento deve essere compiuta una scelta, sia in funzione degli strumenti di salvaguardia da adottare, sia in funzione delle caratteristiche geomorfologiche ed altimetriche dell'area da coprire, sia in funzione della tipologia e della copertura di dati effettivamente disponibile.

Questa è l'impostazione che, correttamente, viene espressa nel testo e negli allegati del D.Lgs. 152/1999 e D.Lgs. 258/2000, relativamente alla materia specifica.

### 5.3 Il fattore scala nella cartografia di vulnerabilità

Appare, dunque, evidente che il dettaglio dello strumento di piano e, quindi la scala delle cartografie, deve essere adeguato per ciascuno dei livelli di pianificazione. A livello di piano di bacino idrografico, può essere sufficiente una cartografia di livello orientativo ( $500.000^{-1}$  e più) poiché sono previsti successivi approfondimenti di analisi territoriale basati su denominatori di scala sempre più operativi, sino a giungere al dettaglio richiesto dai Piani Regolatori Comunali ( $10.000^{-1} \div 5.000^{-1}$ ).

La questione del necessario dettaglio, sempre presente nell'ambito della pianificazione del territorio è, però, ormai, un falso problema: la tecnologia GIS si è profondamente sviluppata ed è divenuta anche relativamente economica, divenendo indispensabile in ogni ambito pianificatorio. Uno dei tanti vantaggi del GIS è quello di rendere la scala di restituzione un concetto superato. Molto più importante, invece, è la distribuzione e la densità delle informazioni, l'elaborabilità, ed il loro continuo aggiornamento in modo da poter produrre cartografie di piano non più cristallizzate nel tempo ma aggiornate continuamente e riproducibile alla scala richiesta di volta in volta e in tempo reale.

Con l'uso di un GIS, accoppiato ad una banca-dati continuamente aggiornata, come si è realizzato nel caso del Progetto Tanaro, si rende dinamico lo scenario statico offerto da una cartografia della vulnerabilità di tipo tradizionale, fornendo in tal modo agli Enti programmatori un potente strumento di piano e di controllo. In Tabella 5.1. sono riportati i principali utilizzi di tale strumento, unitamente alle scale più indicate per i diversi casi e i differenti livelli di pianificazione.

La pianificazione territoriale ai vari livelli finalizzati alla protezione delle RIS viene effettuata, ai sensi delle leggi vigenti nel nostro Paese, da 4 diversi Organi delle Istituzioni, in parte gerarchicamente sovraordinati:

- l'Autorità di Bacino;
- la Regione;
- la Provincia;
- il Comune.

Tra tali organi responsabili del governo del territorio, a seconda delle diverse norme sinteticamente riportate più avanti (Tabella 5.1), esistono diversi livelli di rapporto, troppo complessi e numerosi per poterli disaminare in questa sede, ma che sono desumibili per grandi linee da quanto riportato in Tabella 5.2. A ciascuno di tali livelli di responsabilità compete un intervento pianificatorio (definizione dei limiti d'uso del territorio, piani di settore, pianificazione e sfruttamento appropriato delle risorse idriche sotterranee) che può essere realizzato ai fini della protezione delle risorse, mediante l'uso delle Carte della vulnerabilità come strumento di piano.

#### 5.3.1 Analisi a grande scala

A scala di bacino o di intera regione (da  $50.000^{-1}$  a  $500.000^{-1}$ ) le finalità sono connesse la valutazione complessiva della risorsa in termini qualiquantitativi e all'indicazione degli scompensi principali che indichino l'ubicazione delle condizioni non sostenibili a lungo termine dal sistema acquifero; si cita tra questi la presenza di trend piezometrici che indichino sovrasfruttamento, indicazioni di stato chimico che evidenzino il superamento di soglie critiche per la presenza di sostanze azotate, sostanze organiche o eventuali metalli.

Le indicazioni di vulnerabilità sono integrate all'organizzazione delle conoscenze in merito alla ricarica degli acquiferi, alle indicazioni delle volumetrie idriche di riserva, a tutti quei fattori che si

collocano in condizioni di equilibrio o disequilibrio. Il quadro informativo che ne emerge varia a seconda delle condizioni morfologiche e antropiche, in quanto la migliore resa di tali carte si verifica nelle aree collinari e montane, o comunque in aree a medio basso livello di antropizzazione; al contrario, a questa scala la cartografia non è sufficiente a descrivere le dinamiche di stato e pressione nei dintorni dei sistemi urbani. Sempre a scala ampia, il quadro normativo eventualmente collegato è prevalentemente da strutturare in indirizzi per la pianificazione sottoordinata (a scala di provincia, di comune o di ente parco, ad esempio) e in consigli / prestazioni generali per la progettazione di interventi di particolare rilevanza (invasi idrici, opere infrastrutturali, interventi acquedottistici).

### 5.3.2 *Analisi a media scala*

Una scala intermedia, di maggior dettaglio (da 25.000<sup>-1</sup> a 100.000<sup>-1</sup>), la più diffusa e utilizzata nei prodotti cartografici fino ad oggi, si adatta a strumenti di pianificazione provinciale (Piani Territoriali di Coordinamento Provinciale, PTCP, ex L. 142/90 ora L. 267/2000), in cui il quadro descrittivo della vulnerabilità intrinseca è più direttamente collegabile a pressioni localizzabili sul territorio (siti sorgenti, puntuali o diffusi) e a bersagli ambientali e antropici (risorsa nel suo complesso e pozzi di prelievo civile).

A questa scala coincidono altri due utenti, in corso d'istituzione in Italia, che sono rappresentati dall'Autorità d'ambito territoriale ottimale (ex L. 36/1994) e dalle città metropolitane (L. 267/2000), in quanto strumenti di governo del servizio idrico per gli usi antropici e delle dinamiche urbane dei centri capoluogo. Indipendentemente dal livello di attuazione di tali realtà amministrative, sicuramente controverse al momento attuale, le competenze specifiche di approvvigionamento idrico e di sostenibilità dello stesso comportano un forte legame con i contenuti di gestione delle risorse e tutela, nonché con gli strumenti cartografici e normativi connessi alla vulnerabilità all'inquinamento del sistema idrico sotterraneo.

Dalla cartografia a questa scala è possibile anche ipotizzare previsioni per eventuali possibili depauperamenti della risorsa; in tal senso si osserva che, laddove è disponibile anche una serie storica di monitoraggio (come previsto dall'allegato I del D.Lgs. 152/1999), risulta più agevole ricostruire possibili percorsi di contaminazione che colleghi le sorgenti coi bersagli. In tal senso la cartografia assume anche uno strumento di gestione delle problematiche idrogeologiche.

### 5.3.3 *Analisi a piccola scala*

Le cartografie a scala di maggior dettaglio (10.000<sup>-1</sup>), se assumevano in passato unicamente un ruolo di pura analisi ambientale, stanno recentemente evolvendo verso un maggior controllo delle dinamiche territoriali, con un maggior legame con lo strumento più forte della pianificazione ovvero sul Piano Regolatore Generale Comunale.

Il contenuto del Piano Regolatore, attraverso la zonazione dell'area comunale e le norme regolamentari connesse, può incidere in modo determinante su uno sviluppo ambientale armonico o sulla creazione delle condizioni meno favorevoli al mantenimento di una qualità elevata delle risorse fisiche. Nell'ambito dello strumento urbanistico comunale, lo studio geologico *latu sensu* è oggi obbligatorio ma, sovente, esso manca delle necessarie estrinsecazioni applicative ed è, dunque, scarsamente considerato al momento delle scelte urbanistiche. E', invece, da tale studio che possono individuarsi elementi di estremo dettaglio per la protezione delle acque sotterranee in sede locale, che le scelte urbanistiche possono condizionare in positivo o in negativo.

In particolare, la zonazione inerente la suscettibilità naturale del sistema acquifero deve essere eseguita a monte delle scelte decisionali e deve altresì trovare conferma dalle scelte decisionali degli strumenti di piano. Inoltre essa deve saper indirizzare la progettazione verso performances ambientali; si citano ad esempio elementi quali il grado di impermeabilizzazione del territorio, le

modalità di gestione del ciclo delle acque, la verifica delle aree già urbanizzate con la delocalizzazione o messa in sicurezza di centri di pericolo, le modalità di riutilizzo di aree ex industriali, la razionalizzazione del collettamento delle acque reflue, etc. : questi elementi pianificatori e progettuali devono trovare una collocazione normativa all'interno degli strumenti di pianificazione operativa, come il PRG.

L'analisi a piccola scala assume pertanto sempre di più un ruolo di supporto a corpi normativi sul territorio, atti alla gestione delle risorse e nelle attività antropiche; lo stesso uso della carta è funzionale alla gestione del rischio ambientale; ne consegue che laddove il rischio è più elevato (ovvero dove sono localizzate le massime vulnerabilità e/o le massime pressioni) sorge la necessità di un prodotto cartografico anche a questa scala. Viene progressivamente abbandonato quel ruolo di tipo conoscitivo che viene espresso nella cartografia a grande scala e, in minor misura, a media scala.

Infine, si fa presente che, introducendo le norme di gestione delle aree di salvaguardia dei pozzi ad uso civile, in caso di protezione dinamica dell'attività di salvaguardia si instaura uno stretto legame con le attività di monitoraggio degli acquiferi sottiacenti e una rilevante attività di messa in sicurezza e/o delocalizzazione delle attività impattanti. Il dialogo tra la pianificazione urbanistica e le azioni di tutela e risanamento ambientale deve pertanto avvenire tramite la cartografia di vulnerabilità gli strumenti normativi della pianificazione.

## 5.4 Conclusioni

Ripercorrendo l'ordine gerarchico inverso dei vari livelli di pianificazione, ci si rende conto che ogni livello sovraordinato ha modo di intervenire su uno strumento urbanistico che non abbia tenuto nel giusto conto gli elementi sopra indicati. Ciò che appare evidente è che elementi territoriali contermini possono essere soggetti a scelte pianificatorie contrastanti se non contraddittorie perché non sono riferite ad una comune matrice di lettura del territorio quale quella che può essere resa disponibile da sistemi informativi territoriali interfacciati ad una comune banca dati. In Tabella 5.2 sono, come si è visto, presentate le utilizzazioni delle Carte della vulnerabilità (Civita, 1994) accoppiate ad una sintetica indicazione delle normative alle quali si riferiscono i diversi livelli istituzionali, quando queste sono ben chiare, oppure alle norme generali di pianificazione meglio correlabili. Nei riferimenti normativi ivi riportati si può evincere che, in molti casi, i livelli amministrativi d'ordine inferiore hanno competenze che devono esercitarsi nell'ambito decisionale preordinato da un livello superiore. Ciò comporta, a fronte delle difficoltà di sovrapposizione di strumenti (cartografici) di piano elaborati con diverso livello d'affidabilità, possibili incertezze e contraddizioni. Una possibile soluzione allo scopo di garantire la certezza del diritto potrebbe consistere nel costruire i riferimenti a maggior denominatore di scala da una sintesi di quelli di maggior dettaglio realizzati dalle Amministrazioni locali, utilizzando norme d'indirizzo e coordinamento fissate dagli Enti sovraordinati.

In molti casi, alle Carte della vulnerabilità, comunque realizzate, sono aggiunte altre mappe di discriminazione o d'integrazione (Civita, 1977) utilissime per comprendere ulteriormente lo scenario delineato. Dati georeferenziati sulla densità di drenaggio, sul bilancio idrogeologico (apporti e perdite), sulla qualità delle acque d'interscambio, sono spesso indispensabili per valutare quanto i fenomeni di diluizione possano influire positivamente (attenuazione) o negativamente (carico inquinante) sul rischio d'inquinamento.

Nell'ottica di un ulteriore progresso scientifico e tecnico, la valutazione della vulnerabilità degli acquiferi con modelli parametrici rappresenta uno dei prodromi basilari per la determinazione del rischio d'inquinamento globale. Per le relative metodologie e le applicazioni a test-sites si rimanda a Civita (1995), Civita & De Maio (1997), Civita (2000). Altri tipi di metodologie, ampiamente sperimentate per valutare l'impatto reale e potenziale di un cdp sulle fonti d'approvvigionamento idrico circostante sono descritte in Civita et al. (1998) ed in Civita et al. (2001).



**Tabella 5.1 - Azioni di pianificazione e tutela delle risorse idriche sotterranee (RIS), Enti Pubblici preposti e riferimenti normativi [Fonte: Civita, Filippini et Al. (1995), integrata]**

Utilizzazione delle Carte della vulnerabilità	Stato	Autorità di bacino	Regione	Provincia	Comune	Scala consigliata	Normative di riferimento
1. Previsione delle possibili conseguenze di situazioni di inquinamento puntuale (potenziale o in atto) delle RIS		•	•	•	•	1:25.000 ⇓ 1:10.000	L. 183/89
2. Previsione delle possibili conseguenze di situazioni di inquinamento diffuso (potenziale o in atto) delle RIS		•	•	•	•	1:50.000 ⇓ 1:5.000	D.Lgs. 152/99
3. Giudizio preventivo di progetti di inserimento di nuove attività nel territorio o di trasformazioni territoriali coinvolgenti l'acquifero sottostante	•		•	•	•	1:25.000 ⇓ 1:10.000	DPR 334/99 L. 9/91 D.Lgs. 139/92
4. Identificazione di zone che meglio si prestano per l'insediamento di attività potenzialmente pericolose per l'acquifero sottostante			•			1:50.000 ⇓ 1:5.000	L.441/87
5. Giudizio di compatibilità tra attività esistenti e vincoli da imporre su parti del territorio al fine di prevenire inquinamenti delle RIS		•	•		•	1:50.000 ⇓ 1:10.000	L.183/87
6. Processo decisionale in merito allo spostamento di opere di presa idropotabili a rischio o indifendibili con il sistema di aree di salvaguardia			•	•	•	1:50.000 ⇓ 1:5.000	D.Lgs. 152/99 L. 1129/
7. Identificazione di RIS strategiche, scarsamente soggette a rischio di inquinamento, da vincolare preventivamente (aree di riserva)		•	•			1:50.000 ⇓ 1:5.000	L.183/87 DPR 61
8. Identificazione delle priorità nelle operazioni di disinquinamento degli acquiferi vulnerati (piani di risanamento puntuali e zonali)	•	•	•			1:500.000 ⇓ 1:50.000	L.441/87
9. Progettazione delle reti di monitoraggio, a qualsiasi livello territoriale, sia per la sorveglianza, sia per la previsione di inquinamenti delle RIS		•	•	•		1:500.000 ⇓ 1:50.000	L. 183/87
10. Pianificazione globale di vasti territori ove sussistono scompensi antropogenici da correggere o mitigare	•	•	•			1:100.000 ⇓ 1:50.000	DPR 61 L. 183/87

**Tabella 5.2 - Linee-guida per l'uso delle Carte della vulnerabilità allo scopo di normare e controllare le fonti potenziali di inquinamento potenzialmente presenti in un territorio (Fonte: Civita, Filippini et al, 1995 – modificata e integrata)**

Grado di vulnerabilità intrinseca	Fonti puntuali	Fonti non-puntuali
Estremamente elevata (Ee) ↓ Elevata (E)	<p>a. Alcune attività ad alto rischio d'inquinamento sono fortemente sconsigliate. Se preesistenti o non spostabili in siti più idonei, sono da sottoporre a vincoli e controlli rigorosi e azioni di prevenzione che innalzano sensibilmente i costi di insediamento e di gestione. Da escludere le industrie a rischio previste dalla direttiva CEE Seveso (ora D.Lgs. 334/99) come recepito dalle norme italiane nonché tutte le attività che comportano uno scarico diretto o indiretto nelle acque sotterranee delle sostanze degli elenchi I e II allegati al D.Lgs. 132/92 o le operazioni di eliminazione e di deposito di rifiuti.</p> <p>b. Non sono da effettuare scarichi in acque superficiali di sostanze inquinanti o deve comunque essere garantito che, in tutte le condizioni di portata del corso d'acqua che è in connessione con le falde idriche, siano rispettate caratteristiche di qualità almeno entro quella indicata dalla Tab. I/A del D.Lgs. 152/99 (allegato 2).</p>	<p>A. Sono da proibire scarichi inquinanti in acque superficiali o deve essere comunque garantito che, in tutte le condizioni di portata dei corsi d'acqua, nei tratti in connessione con gli acquiferi, siano garantite condizioni di qualità consone a quanto indicato nella Tab. I/A del D.Lgs. 152/99 (allegato 2).</p> <p>B. Devono mettersi in essere revisioni delle normali pratiche agronomiche o attivati nuovi indirizzi colturali al fine di prevenire la dispersione di nutrienti e fitofarmaci nell'acquifero sottostante: applicazione del codice di buona pratica agricola (Dir. CEE 91/676); iniziative di lotta guidata/integrata; scelta di nuovi indirizzi colturali tali da controllare la diffusione nel suolo e nel sottosuolo di azoto e altri nutrienti.</p> <p>C. Qualora non sia garantito, nonostante gli interventi suindicati, che le acque superficiali rientrino in Tab. I/A del D.Lgs. 152/99 (allegato 2), si dovranno adottare interventi di attenuazioni dei carichi derivanti dal ruscellamento mediante tecniche a basso contenuto energetico con possibilità di recupero dei nutrienti.</p>
Alta (A) ↓ Media (M)	<p>c. Devono essere controllate tutte le attività che possono modificare direttamente o indirettamente la qualità delle RIS. Per ciascuna di esse devono essere previsti appropriati interventi di attenuazione dei carichi inquinanti.</p> <p>d. Particolari precauzioni sono da prevedersi nell'autorizzazione le attività che comportano uno scarico diretto o indiretto nelle acque sotterranee delle sostanze dell'elenco II allegato al D.Lgs. 132/92 o le operazioni di eliminazione e di deposito di rifiuti. Le autorizzazioni devono tenere conto della natura a quantità degli effluenti in relazione alle caratteristiche idrogeologiche ed idrauliche del corpo ricettore.</p> <p>e. Se lo scarico delle attività insediate o previste deve avvenire in corsi d'acqua che interessano zone con grado di vulnerabilità Ee o E, si applica quanto previsto al punto C.</p>	<p>D. Forte limitazione di smaltimento dei liquami zootecnici</p> <p>E. Vedi quanto riportato al punto D.</p> <p>F. L'uso di fertilizzanti e liquami zootecnici è ammissibile previa adozione di un piano di concimazione laddove la gestione è affidata a servizi con sistemi di autocontrollo verificabili. Da privilegiare forme di gestione consortili con partecipazione della Pubblica Amministrazione.</p>
Bassa (B) ↓ Estremamente bassa (Bb)	<p>f. Non è previsto nessun vincolo per le attività insediate o da insediarsi fatte salve le verifiche puntuali.</p>	<p>G. Nessuna limitazione d'uso, salvo che per il controllo del ruscellamento verso aree a vulnerabilità più elevata. In tal caso, la qualità delle acque superficiali deve rientrare in Tab. I/A del D.Lgs. 152/99 (allegato 2).</p>



## 6. Bibliografia

AA.VV. (1988) - Proposta di normativa per l'istituzione delle fasce di rispetto delle opere di captazione di acque sotterranee. GNDICI-CNR, Pubbl. 75 (V. Francani & M. Civita editori), GeoGraph Segrate, 277 pp.

AA.VV. [Civita M. edit.] (2000) – Bacino del Fiume Tanaro: studio sui potenziali rischi dovuti all'alluvione del novembre 1994 e realizzazione di una rete di monitoraggio delle acque sotterranee nonché identificazione dei siti potenzialmente pericolosi e valutazione della vulnerabilità della falda. Relazione Finale. Regione Piemonte, G.d.L in Idrogeologia Applicata DIGET – Politecnico di Torino, 254 pp., 16 Tav. (con relativa bibliografia).

Albinet M., Margat J. (1970) - Cartographie de la vulnérabilité à la pollution des nappes d'eau souterraine. Bull. BRGM Paris , 2, 3, 4. pp. 13-22.

Alioto M.N. (1982) - Valutazioni di alcune costanti idrologiche e relazioni con caratteri del suolo. Tesi di Laurea Fac. Sc. Agrarie, Firenze (inedita).

Aller et al. (1985) - DRASTIC: A Standardized System for Evaluating Ground Water Pollution Potential Using Hydrogeologic Settings. EPA/600/2-85/018. 163 pp.

Aller L, Bennet T., Lehr J.H., Petty R.J., Hackett G. (1987) - DRASTIC: A standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings. NWWA/EPA Ser., EPA600/287035. 455 pp. 11 Carte e relat. legende. (con relativa bibliografia).

Antonelli R., Mari G.M. (1993) - Carta di vulnerabilità naturale con Note Illustrative. Pubbl. 947 GNDICI-CNR, Reg. del Veneto, Serv. Geol. Naz. p. 1-11. 1 Carta.

Baraldi F., Campana G., Castaldini D., Paltrinieri N., Spallacci P., Zavatti A. (1995) - La capacità di attenuazione del suolo tra i fattori di valutazione della vulnerabilità all'inquinamento degli acquiferi. Due esempi : area morenica mantovana e alta pianura modenese (Italia Settentrionale). Atti 2° Conv. Naz. "Protezione e Gestione delle Acque Sotterranee : Metodologie, Tecnologie e Obiettivi", Nonantola (Modena), 3, pp. 123 - 140.

Barrocu G., Ghiglieri G., Uras G. (1999) – Carta della Vulnerabilità nella piana deltizia del Fiume Flumendosa. (In stampa)

Bencini A., Gargini A., Pranzini G. (1993) - Relazione fra qualità delle acque di sottosuolo, vulnerabilità delle falde ed ubicazione dei centri di pericolo nel bacino Firenze-Pistoia. Estr. Atti 2° Conv. Int. di Geoidrologia, Firenze, 29 novembre - 3 dicembre 1993.

Benacchio S., Bianchi M., Camilla S., Dazzi R., Ferronato A., Fontana F., Fumagalli F., Gatto G., Mari G.M., Mozzi G., Pilati G., Siviero G., Speciale M., Zambon G. (1988) - Difesa degli acquiferi dell'alta pianura veneta, stato di inquinamento e vulnerabilità delle acque sotterranee del bacino del Brenta. 5: Vulnerab. dei corpi idrici sott. all'inquinamento. Mon. GNDICI-CNR (UU.OO. 4.5 e 4.6). 21 p., 2 Carte.

Beretta G.P., Colombo F., Pranzini G. (1995) - Progettazione e ottimizzazione di una rete di monitoraggio delle acque sotterranee nella media valle del fiume Arno (Toscana) mediante l'uso della teoria delle variabili regionalizzate. Atti 2° Conv. Naz. sulla protezione e gestione delle Acque sotterranee: Metodologie, Tecnologie e Obiettivi. Nonantola (Modena), 17-19/05/1995.



Beretta G.P., Fumagalli L., Gabbani G., Gargini A., Pranzini G. (1993) - Vulnerability of the groundwater resources in the Pistoia plain (Tuscany, Italy): a preliminary investigation, using the herbicide 2,4-D. Atti di IX Symposium Pesticide Chemistry: degradation and Mobility of Xenobiotics, Piacenza, Ottobre, 1993, pp. 645-657.

Born S.M., Stephensons D.A. (1969) - Hydrogeologic considerations in liquid waste disposal. Journ. Soil and Wat. Conserv. 24, 2, pp. 52-55.

Boumans L., Breeuwsma A., Van Duijvenbooden W., Groot Obbink D.J., Jelgersma S., Van Straten H., Wösten J.H.M. (1987) - Kwetsbaarheid van het grondwater. RIVM Rapport 840397003. 69 pp., 12 Carte (in Olandese).

Bradbury K.R., Rothschild E.R. (1985) - A computerized technique for estimating the hydraulic conductivity of aquifers from specific capacity data. Ground Water, 23, 2, pp. 240-246.

Breeuwsma A., Wosten J.H.M., Vleeshouwer J.J., Van Slobbe A.M., Bouma J. (1986) - Derivation of land quality to assess environmental problems from soil surveyes. Sci. Soc. Am. J. 50. pp. 186-190.

Busoni E., Borselli L., Calzolari C. (1995) - Caratteristiche fisiche ed idrologiche del suolo. Monografia GNDCI-CNR, Grafica Metelliana (Cava de'Tirreni), 137 pp.

Carter A.D., Palmer R.C., Monkhouse R.A. (1987) - Mapping the vulnerability of groundwater to pollution from agricultural practice, particularly with respect to nitrate. Atti Int. Conf. Vulnerab. of Soil and Groundw. to Pollutants, RIVM Proc. and Inf., . 38. p. 333-342.

Cavalli C. (1995) - Applicazione dell'analisi di facies alla prospezione idrogeologico-ambientale. Case History : Distribuzione e vulnerabilità delle risorse idriche del settore orientale della Pianura cuneese. Tesi di Dott. di Ric. in Ing. Geologico Ambientale (VI Ciclo), Politecnico di Torino. (inedita).

Cavallin A., Cerutti P., Lauzi S., Mancuso M., Mazzarella S. (1987) - Metodologie e problematiche per la realizzazione di carte di vulnerabilità degli acquiferi: esempio nel territorio comunale di Cassina de' Pecchi. Acque Sotterranee in Lombardia a cura di P. Casati, CNR CSSPAC. Milano. pp. 115-123.

Celico F., Celico P. (1994) - Vulnerabilità all'inquinamento dei massicci carbonatici dell'Appennino centro-meridionale. Il metodo DRASTIC.mc. Atti 4° Congr. Intern. di Geoingegneria (10-11 marzo 1994), Torino, 2, pp. 285-294.

Cimino A., Lo Brutto M. (1999) - La vulnerabilità all'inquinamento degli acquiferi dell'area metropolitana di Palermo. La Piana di Bagheria. Atti "3° Conv. Naz. sulla Protezione e Gestione delle Acque Sotterranee per il III Millennio", pp. 1.73 - 1.82, Parma 13-15/10/1999.

Cimino A., Martorana R., Medico S. (1999) - La vulnerabilità all'inquinamento delle risorse idriche sotterranee. Boll. Ordine Regionale dei Geologi di Sicilia. N° 1 (1999); pp. 4-14.

Civita M. (1969.a) - Idrogeologia del massiccio del Terminio-Tuoro (Campania). Memorie e Note Ist. Geol. Applic. Napoli, 11.

Civita M. (1969.b) - Valutazione analitica delle riserve in acqua sotterranea alimentanti alcune tra le principali sorgenti del massiccio del Matese (Italia meridionale). Mem. Soc. Naturalisti in Napoli, Supp. vol. 78.

Civita M. (1973) - L'infiltrazione potenziale media annua nel massiccio del Matese (Italia Meridionale). Atti 2° Conv. Intern. Acque Sotterr., Palermo, pp. 1-14.

Civita M. (1975) - Criteri di valutazione delle risorse idriche sotterranee in regioni carsiche. Atti 3° Conv. Intern. Acque Sotterr., Palermo, pp. 217-237.

Civita M. (1977) - La Geologia tecnica nella pianificazione globale del territorio: schema operativo di cartografia tematica integrata a livello regionale. Boll. Ass. Min. Subalpina, 14, 2.

Civita M. (1987) - La previsione e la prevenzione del rischio d'inquinamento delle acque sotterranee a livello regionale mediante le Carte di Vulnerabilità. Atti Conv. "Inquinamento delle Acque Sotterranee: Previsione e Prevenzione", Mantova, pp. 9-18.

Civita M. (1990.a) - La valutazione della vulnerabilità degli acquiferi. Atti 1° Conv. Naz. "Protezione e Gestione delle Acque Sotterranee: Metodologie, Tecnologie e Obiettivi", 3, Marano sul Panaro, pp. 39-86.

Civita M. (1990.b) - Legenda unificata per le Carte della vulnerabilità dei corpi idrici sotterranee/ Unified legend for the aquifer pollution vulnerability Maps. Studi sulla Vulnerabilità degli Acquiferi, I (Append.), Pitagora Edit. Bologna. 13 pp.

Civita M. (1992) - Vulnerabilità delle risorse idriche e progetti normativi connessi. Atti Conv. Protezione delle Risorse Idriche. Reggio Emilia. p. 187-208.

Civita M. (1994) - Le Carte della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento: Teoria & Pratica. Pitagora Editrice, Bologna, 325 pp.

Civita M. (1995) - Sul rischio di inquinamento delle risorse idriche sotterranee. Atti 2° Conv. Naz. "Protezione e Gestione delle Acque Sotterranee: Metodologie, Tecnologie e Obiettivi", Nonantola (Modena), 4, pp. 103-119.

Civita M. (1995) - Valutazione parametrica della vulnerabilità intrinseca e preparazione della Carta della vulnerabilità integrata dell'acquifero alimentante le Sorgenti del Peschiera (Rieti). Progress Report n. 5 per ACEA (Roma) Inedito.

Civita M. (1998) - Un codice numerico per la valutazione della conducibilità idraulica da dati di portata specifica dei pozzi: il Programma Qspec. U.O. 4.1. GNDICI-CNR (inedito).

Civita M. (2000) - Dalla vulnerabilità al rischio d'inquinamento. Relazione Generale Sessione I Conv. Naz. Sulla "Protezione e Gestione delle Acque Sotterranee per il III Millennio", Parma, 13-15/10/1999, Atti, Vol. 3 (in stampa).

Civita M. (2000) - Il problema della vulnerabilità degli acquiferi. Atti del Convegno Nazionale "Nitrati, acqua e suolo da salvaguardare" GEOFLUID 2000, Quaderni dell'ARPA ER (in stampa)

Civita M., Chiappone A., Falco M., Jarre P. (1990) - Preparazione della Carta di Vulnerabilità per la rilocalizzazione di un impianto-pozzi dell'Acquedotto di Torino. Atti 1° Conv. Naz. "Pro-

tezione e Gestione delle Acque Sotterranee: Metodologie, Tecnologie e Obiettivi", 2, Marano sul Panaro.

Civita M., Cocozza T., Forti P., Perna G., Turi B. (1983) - Idrogeologia del bacino minerario dell'Iglesiente (Sardegna Sud Occidentale). Mem. Ist. Ital. Speleol., 2.

Civita M., D'Ecclesiis G., De Maio M., Grassi D., Sdao F. (2001) – Groundwater vulnerability mapping in Lauria Ridge (Southern Italy) using SINTACS method. 7th Conf. on Limestone Hydrology and Fissured Media, Besançon, 20-23 sept. 2001 (in stampa).

Civita M., De Maio M. (1995) - L'analisi per scenari dinamici di situazioni ambientali a rischio multiplo di degrado delle acque destinate a scopi potabili. Boll. GEAM 32, 4 (1995), pp. 233-238.

Civita M., De Maio M. (1997.a) – SINTACS Un sistema parametrico per la valutazione e la cartografia della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento. Metodologia e automazione. Pitagora Editrice, Bologna, 191 pp.

Civita M., De Maio M. (1997.b) - Assessing groundwater contamination risk using ARC/INFO via GRID function. Proc. ESRI User Conference. S. Diego (California). July 8-11 1997, paper 591

<http://www.esri.com/library/userconf/proc97/proc97/to600/pap591/p591.htm>

Civita M., De Maio M. (1998) – Mapping groundwater vulnerability by the point count system model SINTACS. In "Managing Hydrogeological Disasters in a Vulnerable Environment" (Vol. a cura di Andah Kogiu – cosponsored by IHP-UNESCO), Pubbl. GNDCI 1900, p. 243-273.

Civita M., De Maio M. (2000) – Valutazione e cartografia automatica della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento con il sistema parametrico - SINTACS R5 -A new parametric system for the assessment and automatic mapping of ground water vulnerability to contamination, Quaderni e Tecniche di Protezione ambientale, 72, Pitagora, Bologna, 226 pp., 1 CD ROM.

Civita M., De Maio M., Lyakhloufi S. (1999) – Assessment of groundwater intrinsic vulnerability of the Marrakesh Haouz aquifer (Morocco) by pcsms SINTACS. GEAM (Geoengineering, Environment & Mining), 24, 2-3 (1999), pp. 107-114.

Civita M., De Maio G., Olivero B., Vigna (1997) - Previsione e prevenzione dell'inquinamento delle acque sotterranee: metodologie e interventi di ricerca operativa in Italia nordoccidentale In: Volume di sintesi dell'Attività scientifica della L.R. 4 del GNDCI-CNR (a cura di G. Barrocu), Cagliari.

Civita M., De Maio M., Vigna B. (1999) - Una metodologia GIS per la valutazione della ricarica attiva degli acquiferi. Atti 3° Convegno nazionale sulla protezione e gestione delle acque sotterranee per il III Millennio, Parma, 13-15 ottobre 1999. Volume 1, pp. 291-303.

Civita M., De Medici G.B., De Riso R., Nicotera P., Nota D'elogio E. (1973) - Memoria descrittiva della Carta idrogeologica della Campania nord-occidentale. Atti 2° Conv. Intern. Acque Sotterr., Palermo, pp. 3-39, 2 Carte idrogeologiche.

Civita M., De Regibus C. (1995) - Sperimentazione di alcune metodologie per la valutazione della vulnerabilità degli acquiferi. Atti 2° Conv. Naz. "Protezione e Gestione delle Acque Sotterranee : Metodologie, Tecnologie e Obiettivi", Nonantola (Modena), 3, pp. 63-71.

Civita M., De Riso R., Nicotera P. (1970) - Sulla struttura idrogeologica alimentante le sorgenti del F. Sarno e le falde pedemontane profonde della parte sud-orientale della Conca Campana. Atti 1° Conv. Intern. Acque Sotterr., Palermo, pp. 1-24

Civita M., Filippini G., Marchetti G., Paltrinieri N., Zavatti A. (1995) - Uso della Carte di vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento nella pianificazione e gestione del territorio. Atti 2° Conv. Naz. "Protezione e Gestione delle Acque Sotterranee : Metodologie, Tecnologie e Obiettivi", Nonantola (Modena), 3, pp. 142 - 151.

Civita M., Fiorucci A. (1999) - Diagrammi di qualità delle acque sotterranee aggiornamenti e discussioni. Atti 3° Convegno nazionale sulla protezione e gestione delle acque sotterranee per il III Millennio, Parma, 13-15 ottobre 1999, Volume 1, pp. 207-215.

Civita M., Fiorucci A., Machiorlatti M., Miè R. (1999) - Segnalazione di contenuti anomali di alluminio nelle acque sotterranee e superficiali nel territorio di Alba (CN). Atti 3° Convegno nazionale sulla protezione e gestione delle acque sotterranee per il III Millennio, Parma, 13-15 ottobre 1999, Volume 2, pp. 123-137.

Civita M., Fiorucci A., Pizzo S., Vigna B. (1999) - Utilizzazione estensiva delle prove rapide di acquifero per la valutazione della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento. Atti 3° Convegno nazionale sulla protezione e gestione delle acque sotterranee per il III Millennio, Parma, 13-15 ottobre 1999, Volume 1, pp. 105-113.

Civita M., Forti P., Marini P., Meccheri M., Micheli L., Piccini L., Pranzini G. (1991) - Carta della Vulnerabilità all'inquinamento degli acquiferi delle Alpi Apuane (con Note illustrative). Monografia GNDCI-CNR, SELCA, Firenze. 1 Carta, 28 pp.

Civita M., Gargini A., Manzone L., Pranzini G. (1995) - Applicazione del sistema parametrico SINTACS alla valutazione della vulnerabilità intrinseca degli acquiferi nel bacino intrapenninico del Valdarno medio. Atti 2° Conv. Naz. "Protezione e Gestione delle Acque Sotterranee: Metodologie, Tecnologie e Obiettivi", Nonantola (Modena), 3, pp. 41-48.

Civita M., Gargini A., Pranzini G. (1999) - Metodologia di redazione della Carta della Vulnerabilità intrinseca e del rischio d'inquinamento degli acquiferi del Valdarno medio. Atti "3° Conv. Naz. sulla Protezione e Gestione delle Acque Sotterranee per il III Millennio", pp. 1.59 - 1.74, Parma 13-15/10/1999.

Civita M., Jarre P. (1992) - Studio della vulnerabilità degli acquiferi di un nuovo impianto di emungimento di acque potabili per la Città di Torino. Sistema Ambiente, 3, 1, 90-95, Ed. Digitalis, Torino

Civita M., Manzone L., Olivero G., Vigna B. (1991) - Approcci sinergici nelle ricerche sui sistemi idrogeologici carbonatici del Piemonte meridionale. Atti Conv. "Ricerca e Protezione delle Risorse Idriche Sotterranee delle Aree Montuose", Brescia, pp. 53-86.



Civita M., Manzone L., Olivero G., Vigna B. (1995) - Le sorgenti del Maira. Studio di una risorsa idrica di importanza strategica. Atti 2° Conv. Naz. "Protezione e Gestione delle Acque Sotterranee: Metodologie, Tecnologie e Obiettivi", Nonantola (Modena), 1, pp. 231-238, 1 Carta.

Civita M., Musto C., Poggio P. (1998) – Uno strumento operativo per i piani di bonifica di aree inquinate: l'analisi di sito. GEAM, 35, 2-3, p. 153-170.

Civita M., Nicotera P. (1974) - The perturbing effect of a railroad tunnel on the hydrogeological equilibrium of a dolomite structure covering a whole region. Atti 2° Congr. Intern. I.A.E.G., Sao Paulo, pp. III-28. I-III-28.7.

Civita M., Peano G., Vigna B. (1999) – Primi risultati dello studio dell'insaturo carbonatico nel sistema di Bossea (Alpi Liguri – Piemonte Meridionale). Atti "3° Conv. Naz. sulla Protezione e Gestione delle Acque Sotterranee per il III Millennio", pp. I.127 – I.138, Parma 13-15/10/1999.

Civita M., Perna G., Turi B. (1994) - Idrogeologia. In: "Il bacino carbonifero del Sulcis. Geologia, Idrogeologia, Miniere" (a cura di Fadda A., Ottelli L., Perna G), EDISAR (Cagliari), pp. 73-110, 1 Carta idrogeologica 1:25.000.

Civita M., Persicani D. (1996) - Approccio teorico alla definizione e stima della capacità di attenuazione del suolo nei modelli parametrici di valutazione della vulnerabilità degli acquiferi all' inquinamento. GEAM, 4, pp. 209-214.

Civita M., Rossanigo P., Cimo A., Ghirotto S. (2001) - Analisi di rischio d'inquinamento dei terreni e delle acque sotterranee da parte di un impianto di smaltimento: confronto tra metodi. GEAM, 38, 2 (in stampa).

Civita M., Vigna B., Peano G. (1984) - La stazione sperimentale della Grotta di Bossea nel quadro delle ricerche idrogeologiche sui sistemi carsici del Monregalese, Alpi Marittime. Mem. Soc. Geol. It., 29 (1984), pp. 187-207.

Corniello A., de Riso R., Ducci D., Napolitano P., Guarino P.M., Bellucci F. (1995) - Carta della vulnerabilità all'inquinamento dell'acquifero nella zona orientale della Piana Campana. Atti 2° Conv. Naz. "Protezione e Gestione delle Acque Sotterranee: Metodologie, Tecnologie e Obiettivi", Nonantola (Modena), 3, pp. 311-326, 1 Carta.

Corniello A., De Riso R., Ducci D. (1999) – Uso integrato di metodologie per la realizzazione di Carte della Vulnerabilità delle falde all'inquinamento a scala regionale. L'esempio della Provincia di Napoli. Atti "3° Conv. Naz. sulla Protezione e Gestione delle Acque Sotterranee per il III Millennio", pp. I.263 – I.272, Parma 13-15/10/1999.

Corniello A., Ducci D., Monti G.M. (1998) – Piana di Venafro (Molise): Carta della Vulnerabilità all'inquinamento. Atti Convegno dei Lincei "Rischio idrogeologico e difesa del suolo", Roma 1998, pp.311-315.

Cotecchia V., Dauro M., Limoni P.P., Mitolo D., Polemio M. (1999) – La vulnerabilità intrinseca di un'area campione dell'acquifero della Murgia (Puglia). Atti "3° Conv. Naz. sulla Protezione e Gestione delle Acque Sotterranee per il III Millennio", pp. I.11 – I.20, Parma 13-15/10/1999.

Cremaschi M., Rodolfi G. (1991) - Il suolo. Pedologia nelle scienze della terra e nella valutazione del territorio. La Nuova Italia scientifica, Roma, 427 pp.

Cucchi F., Marinetti E., Massari G., Oberti S., Piano C., Zini L. (1999) – Carta della vulnerabilità intrinseca della Pianura Friulana. Atti “3° Conv. Naz. sulla Protezione e Gestione delle Acque Sotterranee per il III Millennio”, pp. 1.283 – 1.290, Parma 13-15/10/1999.

Cucchi F., Marinetti E., Massari G., Oberti S., Piano C., Zini L. (1999) – Carta della vulnerabilità intrinseca della Pianura Friulana. Poster “3° Conv. Naz. sulla Protezione e Gestione delle Acque Sotterranee per il III Millennio”, Parma 13-15/10/1999.

Cucchi F., Marinetti E., Massari G., Oberti S., Piano C., Zini L. (1999) – Carta della vulnerabilità intrinseca dell’acquifero carsico triestino ed isontino. Poster “3° Conv. Naz. sulla Protezione e Gestione delle Acque Sotterranee per il III Millennio”, Parma 13-15/10/1999.

De Regibus C. (1994) - Valutazione della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento. Analisi e confronto delle metodologie: sperimentazione su aree - campione. Tesi Dottor. di Ric. in Ing. Geologico-Ambientale - IV Ciclo - Politecnico di Torino (inedito).

Del Re A.A.M., Trevisan M. (1993) - Testing models of the unsaturated zone. Atti 11° Symp. Pesticide Chemistry, Piacenza, pp. 5-31.

Engelen G.B. (1985) - Vulnerability and restoration aspects of groundwater systems in unconsolidated terrains in the Netherlands. , Atti 18° Cong. I.A.H. p. 64-69.

England C.B. (1973) - Relative leaching potentials estimated from hydrologic soil groups. Wat.Res.Bull.Am.Wat.Res.Ass. 9, 3. pp. 590-597.

FAO (1979) - Soil Survey investigations for irrigation. Soil Bull., 42, Roma.

FAO-UNESCO (1988) - Soil Map of the World. Revised Legend. Roma.

Fenge T. (1976) - Geomorphic aspects of sanitary landfill site selection. .Victoria physical environment and development, cap. 7, H.D. FOSTER (edit.), Western Geogr. Ser., 12. Victoria B.C. p. 241-286

Ferrara V. (1990.a) - Carta della vulnerabilità all'inquinamento dell'acquifero vulcanico dell'Etna alla scala 1:50000. S.E.L.C.A. Firenze.

Ferrara V. (1990.b) - Problemi connessi alla valutazione della vulnerabilità all'inquinamento delle acque sotterranee nell'area vulcanica etnea. , Atti 1° Conv. Naz. Protezione e Gestione delle Acque Sotterranee: Metodologie, Tecnologie e Obiettivi. Marano sul Panaro. I. p. 175-186.

Fetter C.W. (1993) - Contaminant Hydrogeology. Macmillan P.C., New York, 458 pp.

Fetter C.W. (1994) - Applied Hydrogeology. 3a Edizione, Macmillan College Pub. Comp., New York, 691 pp.

Forti et al. (2000) – Carta della Vulnerabilità integrata all’inquinamento degli acquiferi carsici della porzione meridionale delle prealpi bresciane. CNR – GNDCI.

Foster S.S.D. (1987) - Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy. Atti Int. Conf. Vulnerab. of Soil and Groundw. to Pollutants, RIVM Proc. and Inf. 38. pp. 69-86.

Foster S.S.D., Hirata R. (1988) - Groundwater pollution risk assessment. A methodology using available data. Pan Amer. Cent. for Sanit. Engin. and Envir. Scienc. (CEPIS). Lima. 81 pp.

Fried J.J. (1987) - Groundwater resources in European Community. 2nd Phase. Vulnerability-Quality. (Synthetical Report - Inedito).

Gargini A., Pranzini G. (1994) - Map of protection against pollution of aquifers in the Middle Valdarno (Florence - Prato - Pistoia plain). Mem. Soc. Geol. It., 48 (1994), pp. 923-928, 1 f., 1 plate.

Gargini A., Landini F., Pranzini G. (1995) - Studio idrogeologico del territorio comunale di Prato per la valutazione della vulnerabilità intrinseca degli acquiferi mediante un sistema parametrico. Atti 2° Conv. Naz. "Protezione e Gestione delle Acque Sotterranee : Metodologie, Tecnologie e Obiettivi", Nonantola (Modena), 3, pp. 41- 48.

Gargini A., Landini F., Pranzini G. (1995) – Carta della Vulnerabilità intrinseca all'inquinamento degli acquiferi del Comune di Prato (Toscana). CONSIAG – Dipartimento Scienze della Terra Università di Firenze.

Gargini A., Landini F., Pranzini G. (1995) - Studio idrogeologico del territorio comunale di Prato per la valutazione della vulnerabilità intrinseca degli acquiferi mediante un sistema parametrico. Estr. da Quaderni di Geologia Applicata, n. 1/1995.

Giuliano G., Mari G.M., De Amicis M., Cavallin A. (1999) – Acque sotterranee e vulnerabilità nella Pianura Padana, Veneta e Friulana. Cartografie tematiche sperimentali a scala regionale. Atti "3° Conv. Naz. sulla Protezione e Gestione delle Acque Sotterranee per il III Millennio", pp. 1.75 – 1.88, Parma 13-15/10/1999.

Golwer A. (1983) - Underground purification capacity. Groundwat. in Wat. Res. Planning, I.A.H.S. 142, 2. pp. 1063-1072.

Goossens M., Van Damme M. (1987) - Vulnerability mapping in Flanders, Belgium. , Atti Int. Conf. Vulnerab. of Soil and Groundw. to Pollutants, RIVM Proc. and Inf. 38. p. 355-360.

Haertlè T. (1983) - Method of working and employment of EDP during the preparation of groundwater vulnerability maps. Groundwat. in Wat. Res. Planning, I.A.H.S. 142. p. 1073-1085.  
Haimes Y.Y. (1987) - Risk assessment for the prevention of groundwater contamination. N.C.R. Stud. in Geophys. - Groundwater Contamination. 14. pp. 166-169.

Holman D. (1985) - Groundwater potential pollution risk assessment index. In "Groundwater Protection Principles and Alternatives for Rock County, Wisconsin", A. Zaporozec edit., App. B, pp. 67-69.

Hughes G.M., Landon R.A., Farvolden R.N. (1971) - Hydrogeology of solid waste disposal sites in Northeastern Illinois. USEPA, SW122. 154 pp.

Huntley D., Nommensen R., Steffey D. (1992) - The use of specific capacity to assess transmissivity in fractured-rock aquifer. *Ground Water*, 30, 3, pp. 396-402.

Hutchinson W.R., Hoffman J.L. (1983) - A ground water pollution priority system. New Jersey Geol. Surv., O.F. Report 83-4. Trenton, N.J. 32 pp.

Hvorslev M.J. (1951) - Time lag and soil permeability in ground-water observations. Waterways Experiment Station, Corps of Engin., Bull 36. Vicksburg. 22 pp.

IRSA-CNR (1996) - Atti della Giornata di Studio "Cartografia della Vulnerabilità degli Acquiferi : Dagli Studi Conoscitivi all'Applicazione Normativa". Milano, 16 gennaio 1996, Quaderni IRSA-CNR, 99, 115 pp., 14 Tavv.

Isarelsen O.W., Hansen V.E. (1962) - Irrigation Principles and Practices. J. Wiley & Sons, New York.

Jaffe M., Dinovo F. (1987) - Local Groundwater Protection. Amer. Plann. Ass. Chicago. 262 pp.

Josopait V., Swerdtfeger B. (1979) - Geowissenschaftliche Karte des Naturraumpotentials von Niedersachsen und Bremen, CC 3110 Bremerhaven Grundwasser, 1:200000. Niedersächsischen Landesamt für Bodenforshung, Hannover.

Kligfield R. et Al. (1986) - Dating of deformation phases using K-Ar and Ar-Ar techniques: results from the Northern Apennines. *Journal of Structural Geology*, 8, pp. 781-798.

Kruseman G.P., De Ridder N.A. (1994) - Analysis and evaluation of pumping test data. 2ed Edit. ILRI publication 47, Wageningen 377 pp.

Lance E.V., Bitner M.J., Graves T. (1990) - Vulnerability of Bernalillo County groundwater resources. HMWS Task 1.4 Rep., ABQR 33/003, CH2M Hill comp. Albuquerque, N.M. . (inedito).

LeGrand H.E. (1964) - System for evaluating the contamination potential of some waste sites. *Amer. Wat. Works Assoc. Journ.* 56, 8. pp. 959-974.

LeGrand H.E. (1966) - Patterns of contaminated zones of water in the ground. *Wat. Res. Research.* 1, 1. pp. 83-95.

LeGrand H.E. (1983) - A standardized system for evaluating waste disposal sites. *Nat. Wat. Well Assoc. Worthington, Ohio.* 2a edizione. 49 pp.

Leonard R.A., Knisel W.G., Still D.A. (1987) - GLEAMS, groundwater loading effects of agricultural management systems. *Transac. ASAE*, 30, pp. 1403-1418.

Lerner D.N., Issar A.S., Simmers I. (1990) - Groundwater Recharge. *IAH Int. Cont. to Hydrogeol.*, 8, Heise, Hannover, 345 pp.

Marchetti G., Martini E. (1990) - Carta della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento della Valle Umbra Nord, Scala 1:25000. Pubbl. GNDCI - CNR n. 256. Perugia. 1 Carta.

Marcolongo B., Pretto L. (1987) - Vulnerabilità degli acquiferi nella pianura a nord di Vicenza. Pubbl. GNDCI-CNR n. 28. Ed. Grafiche Erredici. Padova. 13 p. 1 Carta.



Masotti L., Pranzini G., Preti F., Gargini A., Landini F., Lubello C. (1993) - Le risorse idriche integrative, sostitutive e di emergenza per l'area di Firenze - Prato - Pistoia: individuazione e programma di studio. Estr. da ANDIS '93, Congresso biennale, Atti vol. I, Palermo - Torre Normanna, 21-23 settembre 1993.

Ministry of the Flemish Community (1986) - Vulnerability map of the groundwater for the Flemish Region. D/1986/3241/50. 10 p.

Olmer M., Rezac B. (1974) - Methodical principles of maps for protection of ground water in Bohemia and Moravia scale 1:200000. Mem. I.A.H. 10, 1. p. 105-107.

OFRNARA (Office of the Federal Register National Archives and Records Administration) (1994) - Chapter 1 - Environment Protection Agency - Appendix A: The Hazard Ranking System. Code of Federal Regulation, Protection of Environment, 40 CFR 300.A1, 497 p.

Ostry R.C., Leech R.E.J., Cooper A.J., Rannie E.H. (1987) - Assessing the susceptibility of ground water supplies to non-point source agricultural contamination in South Ontario. Atti Int. Conf. Vulnerab. of Soil and Groundw. to Pollutants, RIWM Atti and Inf. 38. p. 437-445.

Palmer R.C. (1988) - Groundwater vulnerability Map Severn Trent Water. Soil Survey and Land Res. Cent. 8 p. 7 Carte. Palmquist R., Sendlein L.V.A. (1975) - The configuration of contamination enclaves from refuse disposal sites on floodplains. Ground Wat. 13, 2. p. 167-181.

Pavoni J.L., Hagerty D.J., Lee R.E. (1972) - Environmental impact evaluation of hazardous waste disposal in land. Wat. Res. Bull. of Amer. Wat. Res. Ass. 8, 6. p. 1091-1107.

Pfannkuch H.O. (1990) - Application of risk assessment to evaluate groundwater vulnerability to non-point and point contamination sources. Atti 1° USA/URSS Joint Conf. on Envir. Hydrol. and Hydrogeol. Am. Inst. Hydrol. p. 158-168.

Polemio M., D'Ecclesiis G. (1995) - Vulnerabilità degli acquiferi dei monti di Maratea. Atti Conv. "Grandi Fenomeni gravitativi lenti nei centri abitati delle Regioni alpine ed appenniniche", Maratea 28-30 Settembre 1995 (in stampa).

Pollak Z. (1967) - Possibility to use simplified method of estimation of transmissibility and coefficient of permeability according to unit specific yield. Atti Int. Congr. I.A.H. Istanbul, pp. 481-485.

Razack M., Huntley D. (1991) - Assessing transmissivity from specific capacity in a large and heterogeneous alluvial aquifer. Ground Water, 29, 6, pp. 856-861.

Regione Emilia-Romagna (1995) - "Disciplina dello spandimento sul suolo dei liquami provenienti da insediamenti zootecnici e dello stoccaggio degli effluenti di allevamento". Legge Regionale 24 aprile 1995, n. 50, B.U. 27 aprile 1995, n. 81, Bologna

Regione Toscana (1986) - Carta dell'uso del suolo della Toscana. Scala 1:25000. A cura di M.V. Giordano, P. Legrottigie, R. Nevini. Regione Toscana, Giunta Regionale.

Repubblica Italiana (1933) - "Testo unico delle disposizioni di legge sulle acque e impianti elettrici". R.D. 11 dicembre 1933, n. 1775, G.U. 8 gennaio 1934, n. 5, Roma.

Repubblica Italiana (1942) – “Legge urbanistica”. L. 17 agosto 1942, n. 1150, G.U. 16 ottobre 1942, n. 244, Roma.

Repubblica Italiana (1963) – “Piano regolatore generale degli acquedotti e delega al governo ad emanare le relative norme di attuazione”. L. 4 febbraio 1963, n. 129, G.U. 2 marzo 1963, n. 59, Roma.

Repubblica Italiana (1968) – “Norme delegate previste dall'art. 5 della L. 4 febbraio 1963, n. 129. (Piano regolatore generale degli acquedotti e delega al Governo ad emanare le relative norme di attuazione)”. D.P.R. 11 marzo 1968, n. 1090, G.U. 28 ottobre 1968, n. 276, Roma.

Repubblica Italiana (1976) – “Norme per la tutela delle acque dall'inquinamento”. Legge 10 maggio 1976, n. 319, G.U. 141 del 29 maggio 1976, n. 141, Roma.

Repubblica Italiana (1977) – “Attuazione della delega di cui all'art. 1 della L. 22 luglio 1975, n. 382”. D.P.R. 24 luglio 1977, n. 616, G.U. 29 agosto 1977, n. 234, Roma.

Repubblica Italiana (1986) – “Istituzione del Ministero dell'Ambiente e norme in materia di danno ambientale”. L. 8 luglio 1986 n. 349, G.U. 15 luglio 1986 n. 59, Supplemento Ordinario, Roma.

Repubblica Italiana (1988) – “Attuazione della direttiva C.E.E. n. 80/778 concernente la qualità delle acque destinate al consumo umano, ai sensi dell'art. 15 della legge 16 aprile 1987, n. 183”. D.P.R. del 24 maggio 1988, n. 236, G.U. del 30 giugno 1988, n. 60, Roma.

Repubblica Italiana (1989) – “Norme per il riassetto organizzativo e funzionale della difesa del suolo”. Legge 18 maggio 1989, n. 183, G.U. del 25 maggio 1989, Serie Generale, n. 38, Roma.

Repubblica Italiana (1991) – “Legge quadro sulle aree protette”. L. 6 dicembre 1991, n. 394, G.U. 13 dicembre 1991, n. 292, Roma.

Repubblica Italiana (1992) – “Attuazione della direttiva 80/68/CEE concernente la protezione delle acque sotterranee dall'inquinamento provocato da certe sostanze pericolose”. D.Lgs. del 27 gennaio 1992, n. 132, G.U. del 19 febbraio 1992, n. 41, Roma.

Repubblica Italiana (1992) – “Attuazione delle direttive 76/464/CEE, 82/176/CEE, 83/513/CEE, 84/156/CEE, 84/491/CEE, 88/347/CEE e 90/415/CEE in materia di scarichi industriali di sostanze pericolose nelle acque” – D.Lgs. del 27 gennaio 1992, n. 133, G.U. 18 febbraio 1992 n. 41, Roma.

Repubblica Italiana (1994) – “Disposizioni in materia di risorse idriche”. Legge 5 gennaio 1994, n. 36, G.U. del 19 gennaio 1994, Serie generale, n. 14, Roma.

Repubblica Italiana (1997) – “Attuazione delle direttive 91/156/CEE sui rifiuti, 91/689/CEE sui rifiuti pericolosi e 94/62/CE sugli imballaggi e sui rifiuti di imballaggio”. D.Lgs. del 5 febbraio 1997, n. 22, G.U. del 15 febbraio 1997 n. 38, Roma.

Repubblica Italiana (1998) – “Conferimento di funzioni e compiti amministrativi dello Stato alle regioni ed agli enti locali, in attuazione del capo I della Legge 15 marzo 1997, n. 59”. D.Lgs. 31 marzo 1998, n. 112, G.U. del 21 aprile 1998, n. 116, Roma.

Repubblica Italiana (1999) - "Disposizioni sulla tutela delle acque dall'inquinamento e recepimento della direttiva 91/271/CEE concernente il trattamento delle acque reflue urbane e della direttiva 91/676/CEE relativa alla protezione delle acque dall'inquinamento provocato dai nitrati provenienti da fonti agricole". D.Lgs. 11 maggio 1999, n. 152, G.U. 29 maggio 1999, n. 124, Roma

Repubblica Italiana (1999) - "Approvazione del codice di buona pratica agricola" - D.M. 19 aprile 1999, G.U. 4 maggio 1999, n. 102, Roma.

Repubblica Italiana (1999) - "Attuazione della direttiva 96/82/CE relativa al controllo dei pericoli di incidenti rilevanti connessi con determinate sostanze pericolose". D.Lgs. del 17 agosto 1999, n. 334, G.U. 28 settembre 1999, n. 177/L, Roma

Repubblica Italiana (1999)- "Regolamento recante criteri, procedure e modalità per la messa in sicurezza, la bonifica e il ripristino ambientale dei siti inquinati, ai sensi dell'articolo 17 del D.Lgs. 5 febbraio 1997, n. 22, e successive modificazioni e integrazioni". D.M. 25 ottobre 1999, n. 471, G.U. 15 dicembre 1999, Roma

Repubblica Italiana (2000) - "Testo aggiornato del decreto legislativo 11 maggio 1999, n. 152, recante "disposizioni sulla tutela delle acque dall'inquinamento e recepimento della direttiva 91/271/CEE concernente il trattamento delle acque reflue urbane e della direttiva 91/676/CEE relativa alla protezione delle acque dall'inquinamento provocato dai nitrati provenienti da fonti agricole"" D.Lgs. 18 agosto 2000, n. 258, G.U. 20 ottobre 2000, n. 172/L, Roma

Repubblica Italiana (2000) - "Testo unico delle leggi sull'ordinamento degli enti locali". D.Lgs. 18 agosto 2000, n. 267, G.U. del 28 settembre 2000, n. 162/L, Roma

Schmidt R.R. (1987) - Groundwater contamination susceptibility in Wisconsin. . Wisc. Groundw. Manag. Plan Rep. 5. 27 p.

Shoeller H. (1968) - Méthodes pour obtenir le bilan des eaux souterraines. As. Gen. De Bern AIH Luvaine.

Schoeller H. (1974) - Sur les conditions de circulation dans les calcaires : capacité d'ingestion, capacité d'infiltration. Mem. Cong. Int. IAH Montpellier, 10 (1), 251-252.

Sendlein L.V.A., Palmquist R. (1977) - Strategic placement of waste disposal sites in karst regions. Mem. 12° Cong. I.A.H. p. 328-335.

Silka L.R., Swearingen, T.L. (1978) - A manual for evaluating contamination potential of surface impoundments. U.S. Environmental Protection Agency, EPA - 570/9 - 78 - 003

Soil Conservation Service (1951) - Soil Survey Manual. USDA, 503 pp..

Soil Survey Staff (1975) - Soil Taxonomy. A basic system of soil classification for making and interpreting soil survey. United States Department of Agriculture, Agr. Res. Ser. Handbook 436 , 754 pp.

Somerville S.H. (1986) - Control of groundwater for temporary works. CIRIA Rep. 113. London. 87 pp.

Sotornikova R., Vrba J. (1987) - Some remarks on the concept of vulnerability maps. Atti Int. Conf. Vulnerab. of Soil and Groundw. to Pollutants, RIVM Proc. and Inf. 38. p. 471-475.

Subirana Asturias J.M., Casas Ponsati A. (1984) – Mapa de vulnerabilidad a la contaminacion de los acuíferos del valle bajo del Llobregat (Barcelona). Metodo de trabajo y estudio de la evolucion de las extracciones de aridos. Atti 1° Cong. Espan.de Geol. I, 795-809.

Theis C.V., Brown R.H., Meyer R.R. (1963) - Estimating the transmissivity of aquifers from the specific capacity of wells. In: Bental R (Edit.) - Methods of determining permeability, transmissivity and drawdown. U.S.G.S. Water Supply Paper 1536-I, pp. 331-340.

Trojan M.D., Perry J.A. (1988) - Assessing Hydrogeologic risk over large geographic areas. Minnesota Agric. Exper. Stat. Bull. 585 (item ADSB 3421). 65 pp. (con relativa bibliografia).

Turc L. (1954) - Le bilan d'eaux des sols: relation entre les précipitations, l'évaporation et l'écoulement. Ann. Agron. 5, pp.491-596.

Uggeri A. (1998) – Carta della Vulnerabilità intrinseca ed integrata Comune di Fasano. Inedita.

USEPA (United States Environmental Protection Agency) (1978) - Surface impoundment's and their effects on ground water quality in the United States A preliminary survey. EPA 570/978004, Office of Drinking Water. 275 pp.

USGAO (United States General Accounting Office) (1991) - Groundwater protection: measurement of relative vulnerability of pesticide contamination. USGAO, Washington DC. GAO/PEMD-92-8. 48 pp.

Villumsen A., Jacobsen O.S., Sønderskov C. (1983) - Mapping the vulnerability of ground water reservoirs with regard to surface pollution. Danm. Geol. Unders. Arbog 1982. pp. 17-38, 2 Tavole.

Vrana M. (1968) – “Ochrana prostyc podzemnich vod v Cechach a na Morava. Vysvetlivsky k mape 1:500000”. Wat. Res. Plan Cent., Praha (in Ceco).

Vrana M. (1984.a) – “Methodology for construction of groundwater protection maps”. (Lecture for UNESCO/UNEP Proj. PLCE3/29, Moscow, Sept.1981). Hydrogeological Principles of Groundwater Protection Vol. I Kazlovsky E.A. Edit. in Chief, UNESCO/UNEP. Moscow. p. 147-149.

Vrana M. (1984.b) – “Novinky v mapovani pro ochranu podzemni vody. Puklinove a puklinovoKrasnove vpdy a problemy ich ochrany”. Zborn. 8: p. 379-383. (in Ceco).

Vrba & Zaporozec [Edit.] (1995) - Guidebook on mapping groundwater vulnerability. IAH, Int. Contrib. to Hydrogeol., 16 (1994), Heise, Hannover, 131 pp.

Weltman A.J., Head J.M. (1983) - Site investigation manual. CIRIA Spec. Pubbl. 25. London.

WMSRDC (West Michigan Shoreline Regional Development Commission) (1980) - A pollution nature sampling plan for groundwater contamination in Region 14. Muskegon (Mi).

Zampetti M. (1983) – “Informazioni e dati relativi alla quantità ed alla qualità delle acque sotterranee nella Comunità Europea”. Atti Conf. Int. Inquinamento delle Acque sotterranee da Composti organo-clorurati di Origine industriale. Milano. p. 197-204.



Zaporozec A. (Edit.) (1985) - Groundwater protection principles and alternatives for Rock County, Wisconsin. Wisconsin Geol. and Nat. Hist. Survey, Spec. Rep. 8. 73 pp.

Zaporozec A. (1987) – Groundwater pollution potential of Barron Country, Wisconsin. Wisconsin Geol. And Nat. Hist. Survey, I Carta.

Zavatti A, Cattini Z., Marino L., Paltrinieri N., Pellegrini M., Tagliavini S., Voltolini C. (1993) – Studi sulla vulnerabilità degli acquiferi – Esempi di carte di vulnerabilità a scala regionale: la Pianura Padana. Le province di Parma, Reggio Emilia e Modena. Pitagora Editrice, Bologna, 104 pp.

## Appendice A: Glossario

**Acclività - *Slope*:** pendenza della superficie topografica.

**Acqua sotterranea - *Groundwater*:** acque fluenti nella zona di saturazione di un acquifero. Vedi anche: acquifero.

**Acquifero - *Aquifer*:** unità litologica o parte di essa che consente l'immagazzinamento, il deflusso e il recapito di acque sotterranee. In genere, sinonimo di zona satura nella letteratura anglosassone, viene usato in questo contesto con il significato sistemico (vedi sistema acquifero). Vedi anche: acquifero confinato; acquifero libero.

**Acquifero confinato - *Confined aquifer*:** acquifero limitato superiormente e inferiormente da strati rocciosi poco o per nulla permeabili.

**Acquifero libero - *Unconfined aquifer, water table aquifer*:** acquifero limitato solo inferiormente da livelli impermeabili: la superficie piezometrica ha pressione all'incirca uguale alla pressione atmosferica.

**Adsorbimento - *Adsorption*:** l'attrazione e l'adesione di una pellicola di ioni di una soluzione sulla superficie solida dei granuli o delle pareti di fratture, con i quali viene in contatto tale soluzione. Vedi anche: Assorbimento

**Assorbimento - *Absorption*:** assunzione di sostanze fluide (gas o liquidi) in profondità nella massa di un mezzo roccioso insaturo e/o saturo. Vedi anche: Adsorbimento.

**Avvezione - *Advection*:** processo attraverso il quale dei soluti vengono trasportati dal flusso delle acque sotterranee.

**Bilancio idrogeologico - *Groundwater balance*:** bilancio fra le entrate (ricarica) e le uscite (discarica) di acqua in un determinato sistema idrogeologico, tenuto conto dei cambiamenti di immagazzinamento effettivo delle riserve. Vedi anche: Ricarica, infiltrazione, discarica.

**Biodegradazione - *Biodegradation*:** Demolizione della struttura molecolare delle sostanze organiche da parte di microrganismi.

**Capacità di attenuazione - *Attenuation capacity*:** capacità del sistema acquifero, nelle sue varie parti, di assorbire, diluire o ritardare gli inquinanti mediante una serie di processi fisici, chimici e biologici. Vedi anche: Inquinamento.

**Capacità di autodepurazione:** vedi capacità di attenuazione.

**Capacità di Scambio Cationico - *Cationic Exchange Capacity*:** Capacità di scambio cationico, di un suolo o/e dei mezzi argillosi componenti l'insaturo. Indica la quantità massima di cationi scambiabili con le soluzioni circolanti.

**Carbonio organico - *Organic carbon*:** Carbonio derivato dalla mineralizzazione delle sostanze organiche presente nel profilo di un suolo.

**Ciclo idrogeologico o ciclo dell'acqua - *Hydrogeologic cycle*:** movimento continuo dell'acqua dall'oceano attraverso l'atmosfera alla terra e al sottosuolo e di nuovo all'oceano, tramite vari passaggi e processi.

**Coefficiente di immagazzinamento - *Storage coefficient*:** corrisponde al volume d'acqua rilasciato per drenaggio o pompaggio da un volume unitario di acquifero saturo (acquifero libero); o al volume ceduto da un acquifero in pressione per unità di area per unità di depressione.

**Complesso idrogeologico - *Hydrogeologic complex*:** Un insieme di termini litologici simili, aventi comprovata unità spaziale e giacitura, un solo tipo di permeabilità ed un grado di permeabilità che si mantiene in un campo di variazione ristretto.

**Complesso (livello, strato, unità litologica) geneticamente impermeabile - *Aquifuge*:** un complesso idrogeologico che non contiene e non trasmette acqua sotterranea.

**Complesso (livello, strato, unità litologica) semipermeabile - *Aquitard*:** un complesso idrogeologico saturato ma poco permeabile che si comporta, in genere, da impermeabile relativo, ma capace di cedere o drenare quantità anche apprezzabili di acqua sotterranea da o in acquiferi adiacenti.

**Complesso (livello, strato, unità litologica) idrodinamicamente impermeabile - Aquiclude:** un complesso idrogeologico che può saturarsi ma non trasmettere acqua sotterranea se non in quantità minima.

**Complesso (livello, strato, unità litologica) permeabile insaturo - aquiperm (Foster & Hirata, 1988):** un complesso idrogeologico o parte di esso, permeabile, insaturo o posto in zona insatura, che favorisce il movimento verticale, verso il basso, di acqua sotterranea.

**Complesso (livello, strato, unità litologica) confinante (sp. inferiore, superiore, marginale, ...) - Confining bed:** un complesso idrogeologico a bassa permeabilità strutturalmente adiacente ad un acquifero in modo da confinarlo, superiormente, inferiormente o lateralmente.

**Conducibilità idraulica - Hydraulic conductivity:** misura della permeabilità di una roccia. Vedi anche: Permeabilità.

**Deflusso - Discharge:** flusso d'acqua in uscita dall'acquifero, scarica nell'accezione sistemica di fenomeno opposto a quello della ricarica (Il termine anglosassone viene usato anche nell'accezione di portata, i.e. volume defluito nell'unità di tempo). Vedi anche: ricarica.

**Degradazione aerobica - Aerobic decay:** Decomposizione di sostanze organiche, prevalentemente ad opera di microrganismi, in presenza di ossigeno libero; i prodotti finali del decadimento sono anidride carbonica e acqua. Vedi anche: degradazione anaerobica.

**Degradazione anaerobica - Anaerobic decay:** Decomposizione di sostanze organiche, in assenza di ossigeno; i prodotti finali del decadimento sono arricchiti in carbonio. Vedi anche: degradazione aerobica.

**Desorbimento - Desorption:** processo inverso a quello dell'assorbimento. Confronta con: Assorbimento.

**Diffusione - Diffusion:** processo grazie al quale sia le specie molecolari che quelle ioniche disciolte in acqua si spostano da zone a più alta concentrazione a zone a minore concentrazione.

**Dispersione - Dispersion:** fenomeno per il quale un soluto in acque sotterranee in movimento si miscela con acque non inquinate diminuendo così la sua concentrazione. La dispersione è causata sia dalle differenze di velocità dell'acqua nei pori, sia dalle differenze di portata fra uno strato e l'altro di un filetto fluido.

**Dispersione idrodinamica - Hydrodynamic dispersion:** Il processo per il quale l'acqua sotterranea contenente un soluto è diluita da acque incontaminate durante lo spostamento all'interno della zona di saturazione. Combinazione dei processi di dispersione meccanica e diffusione molecolare

**Evapotraspirazione - Evapotranspiration:** termine del bilancio idrogeologico che esprime la somma dell'evaporazione e della traspirazione della copertura vegetale.

**Gradiente idraulico - Hydraulic gradient:** perdita di carico totale in funzione della distanza tra due punti della superficie piezometrica di un acquifero.

**Infiltrazione - Infiltration:** quota parte di acqua di precipitazione che viene trasferita dalla superficie della terra al sottosuolo. Confronta con: ricarica attiva.

**Inquinamento - Contamination:** introduzione nelle acque sotterranee di sostanze estranee tali da causare un depauperamento chimico e/o fisico della qualità naturale delle acque stesse (non necessariamente tale da recare danno alla salute). N.B. il termine anglosassone pollution non può essere considerato in sinonimia in quanto sottintende, invece, che le sostanze introdotte nelle acque siano tali da causare danno alla salute. Vedi anche: Vulnerabilità, Inquinamento potenziale.

**Inquinamento potenziale - Potential contamination:** possibilità per un acquifero di subire inquinamento. Vedi anche: Vulnerabilità, Suscettibilità.

**Insaturo - Unsaturated zone:** vedi zona insatura. Vedi anche: Zona satura.

**Lagone, laguna biologica, stagno biologico - Lagoon:** fosse scavate nel terreno, di

dimensioni spesso notevoli, utilizzati per depurare scarichi urbani e industriali (con scarichi organici), con eliminazione della fase acquosa mediante evaporazione e percolazione in profondità.

**Lisciviazione - *leaching*:** Azione dilavante e solvente dell'acqua in eccesso che percola attraverso i suoli con rimozione di materiali che vengono portati in profondità.

**Modello concettuale (idrogeologico) - (*hydrogeological*) *conceptual model*:** la descrizione di una situazione idrogeologica che comprende la distribuzione e le proprietà dei complessi rocciosi che formano l'idrostruttura congruente, i limiti fisici, il processo ricarica-discarica e l'idrodinamica all'interno di essa, le caratteristiche chimiche e fisiche delle acque sotterranee. Costituisce l'insostituibile prodromo per qualsiasi logico sviluppo matematico/numerico.

**Non-saturo:** vedi insaturo, zona insatura.

**Nutrienti (elementi nutritivi o riserve minerali) - *Nutrients*:** sono gli elementi essenziali per lo sviluppo dei vegetali. Si dividono in macronutrienti (N, P, K, Ca, Mg, S) e microelementi (Fe, Mn, Zn, B, ...).

**Pennacchio - *Plume*:** nuvola di dispersione dell'inquinante in direzione del flusso dell'acqua sotterranea a partire dal punto (zona) d'origine dell'inquinamento fino al punto (zona) dove la concentrazione dell'inquinante scende al di sotto della C.M.A. Vedi anche: Dispersione.

**Percolazione - *Percolation*:** passaggio di acqua attraverso i meati di rocce e suoli.

**Pericolo di inquinamento - *Ground water pollution hazard*:** pericolo di diffusione (effettivo o potenziale) di un inquinante in un determinato acquifero.

**Permeabilità - *Permeability*:** capacità di un mezzo roccioso dotato di porosità primaria o secondaria di farsi attraversare dall'acqua sotterranea. Vedi anche: Conducibilità.

**Porosità - *Porosity*:** Volume dei vuoti in una roccia, anche non comunicanti; rapporto fra il volume dei vuoti e quello totale della roccia.

**Porosità efficace - *Effective porosity*:** rapporto fra il volume dei vuoti intercomunicanti e il volume totale della roccia.

**Porosità utile - *Specific yield*:** Volume dei vuoti di una roccia occupati da acqua che può essere spostata per drenaggio o per pompaggio (acqua gravifica).

**Porosità di ritenzione - *Specific retention*:** Volume dei vuoti della roccia occupati da acqua legata da forze soverchianti quella di gravità (acqua di ritenzione). La somma della porosità utile e di quella di ritenzione è pari alla porosità totale della roccia.

**Potenziale di inquinamento - *Ground water pollution potential*:** un sinonimo di vulnerabilità degli acquiferi usato da alcuni autori anglosassoni.

**Potenziale redox - *Redox potential*:** Potenziale di ossidoriduzione delle acque sotterranee.

**Precipitazione - *Precipitation*:** acqua che giunge al suolo dall'atmosfera in forma liquida o solida (pioggia, neve, grandine, precipitazioni occulte).

**Processo - *Process*:** trasformazione (idrodinamica, fisica, chimica) degli input-sistema in output-sistema nello spazio e nel tempo (p.e. processo ricarica-discarica, trasformazione delle infiltrazioni in portate sorgive e/o fluttuazioni piezometriche).

**Ricarica - *Recharge*:** apporto di acque di diversa origine e provenienza (piogge, acque superficiali, ecc.) ad un sistema acquifero. Vedi anche: Deflusso.

**Rischio di inquinamento - *Ground water contamination risk*:** probabilità di accadimento di un evento inquinante di data magnitudo e distribuzione.

**Ruscellamento - *Surface runoff*:** quota parte di acqua di precipitazione che defluisce in superficie seguendo la pendenza della superficie topografica.

**Scambio ionico - *Ion exchange*:** uno ione appartenente ad un minerale presente nelle rocce del sottosuolo viene sostituito da un altro ione presente nella soluzione acquosa che vi circola.



**Scambio cationico - *Cationic exchange*:** scambio di base che avviene tra componenti chimiche diverse all'interno del sistema sottosuolo.

**Sensibilità dell'acquifero - *Aquifer sensitivity*:** suscettibilità intrinseca di un sistema acquifero all'inquinamento definita in base alle caratteristiche idrogeologiche e geologiche dell'acquifero ed al suolo soprastante.

**Sistema acquifero - *Aquifer System*:** struttura idrogeologica di geometria nota, comprendente il suolo, l'insaturo e la zona di saturazione di un acquifero, nonché l'area di alimentazione dello stesso e i sistemi idrologici che l'interessano. Il sistema è la sede dei diversi processi, naturali o indotti dall'impatto delle attività umane. Vedi anche: processo.

**Situazione idrogeologica - *Hydrogeologic setting*:** insieme di complessi idrogeologici strettamente interconnessi in un'unica struttura idrogeologica individuabile per geometria, idrodinamica ed idrogeochimica. Vedi anche: Complesso

**Soggiacenza - *Depth to water*:** misura della distanza tra la superficie topografica e la zona di saturazione dell'acquifero soggiacente sulla verticale di un punto.

**Sostanza organica - *Organic matter*:** sostanza di tipo animale e vegetale presente nel suolo (fresca) che viene incorporata mediante processi di mineralizzazione biologica e chimica (humificazione), con produzione di colloidali e C organico.

**Superficie libera - *Water table*:** superficie piezometrica - limite della zona satura di un acquifero libero nel quale la pressione è circa uguale alla pressione atmosferica. Vedi anche: Superficie piezometrica

**Superficie piezometrica - *Piezometric surface*:** sinonimo di pelo libero (acquiferi liberi), ma più propriamente intesa come luogo dei punti di livellamento della pressione dell'acqua in un acquifero libero o confinato.

**Suolo - *Soil*:** materiale non consolidato, presente dalla superficie topografica fino ad 1- 1.5 m di profondità, contenente sostanze organiche e alimentante la copertura vegetale.

**Tempo di transito - *Travel time o anche Time of travel*:** tempo che impiega una particella d'acqua o di inquinante idroportato a spostarsi dalla superficie sino a raggiungere la zona satura dell'acquifero soggiacente.

**Tramissività - *Transmissivity*:** la quantità d'acqua che passa nell'unità di tempo attraverso una sezione retta di acquifero di sezione unitaria e di altezza pari a quella della zona satura, a 20 °C.

**Umidità relativa - *Volumetric water content, Soil moisture*:** contenuto di acqua di un volume di roccia porosa, variabile a seconda delle condizioni tra 0 ed il valore della porosità efficace. Comprende il volume di acqua di ritenzione e parte del volume di acqua gravifica che possono occupare il volume dei vuoti del mezzo quando la saturazione è incompleta.

**Vulnerabilità - *Vulnerability*:** suscettibilità intrinseca di un sistema acquifero a modificare la qualità e la quantità delle acque sotterranee (nello spazio e nel tempo) a causa di processi naturali e/o attività umane (altre definizioni nel Capitolo 2). Vedi anche: Suscettibilità, Inquinamento potenziale

**Zona satura, zona di saturazione - *Saturated zone*:** zona al di sotto della superficie piezometrica dell'acquifero nella quale tutti i pori intercomunicanti sono saturi di acqua. Vedi anche: Insaturo, sistema idrogeologico.

**Zona insatura - *Unsaturated zone*:** zona di aerazione fra la superficie topografica e la zona satura dell'acquifero, i meati della quale contengono sia acqua che aria, in proporzione variabile nel tempo e nello spazio. Comprende la zona di evapotraspirazione, la zona di ritenzione e la frangia capillare. Vedi anche: Insaturo, zona satura.

## Appendice B: Lista delle abbreviazioni e degli acronimi usati nel testo e nella bibliografia

Questa appendice è stata redatta allo scopo di permettere al lettore di interpretare correttamente le molte sigle ed i molti acronimi che è giocoforza utilizzare nel testo dei diversi Capitoli e nelle altre Appendici.

Si è preferito non introdurre direttamente e reiteratamente nei testi le chiavi di interpretazione per non appesantire ulteriormente il discorso tecnico e scientifico.

Nel testo sono state usate le unità di misura e le abbreviazioni del Sistema Internazionale di pesi e misure (SI).

**AA** = Autori (citazione generica).

**AA.VV.** = Autori Vari, lavoro a citazione multipla collettiva.

**AE** = Abitante Equivalente, misura generica dell'inquinamento organico generato dagli effluenti industriali pari al BOD5/d dei rifiuti di una persona media (54 g O)

**a.s.** = acque sotterranee

**AWC** = Available Water Content (Acqua disponibile)

**BGR** = British Geological Survey, Servizio Geologico Britannico.

**BOD** = Biological Oxygen Demand, indicatore analitico di inquinamento delle acque (BOD5 = BOD di 5 d.).

**BRGM** = Bureau de Recherche Géologique et Minière, Agenzia Francese per la Ricerca Geologica e Mineraria.

**CAD** = Computer Aided Design, sistema computerizzato per la grafica e la cartografia.

**CDP** = Centro di pericolo, espressione generica per indicare un fonte/causa antropica, potenziale o reale, puntuale o anche non-puntuale, di impatto inquinante sulle acque sotterranee.

**CEC** = Cationic Exchange Capacity, capacità di scambio cationico di un suolo o un mezzo roccioso

**CIRIA** = Construction Industry Research and Information Association, Londra.

**CMA** = Concentrazione Massima Ammissibile, secondo norma.

**c.m.r.** = Concentrazione massima rilevata

**CSC** = Vedi CEC.

**CSI** = Complessi e Situazioni Idrogeologiche, metodo di valutazione e cartografia della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento.

**DBMS** = Data Base Management System, software principale per organizzare e gestire i dati di un GIS.

**DS** = Denominatore di scala.

**DRASTIC** = Depth to water, net Recharge, Aquifer media, Soil media, Topography, Impact of vadose zone, hydraulic Conductivity of the aquifer, un PCSM (vedi) per la valutazione della vulnerabilità intrinseca degli acquiferi all'inquinamento.

**DTM** = Digital Terrain Modelling, modello digitale del terreno che permette numerose applicazioni e derivazioni di elaborati lineari ed in formato matrice, come p.e. profili, vedute prospettiche, carte delle acclività, delle esposizioni, ecc. (Anche DEM)

**EFQ** = Elemento Finito Quadrato, unità di maglia di un formato a griglia (vedi GF).

**Eh** = Potenziale redox.

**FAO** = Food and Agriculture Organization., organizzazione mondiale per il cibo e l'agricoltura.

**FEM** = Finite element models, modello ad elementi finiti.

**GCP** = Ground Control Point, un punto di controllo a terra di prospezioni e rilevazioni aeroportate.

**GF** = Grid Format, formato a griglia, il risultato di un'interpolazione dei valori di una variabile misurata in punti distribuiti irregolarmente o lungo linee di rilevamento per ottenere valori da attribuire a maglie quadrate.

**GIS** = Geographic Information System, Sistema Informativo Geografico, un sistema computerizzato avanzato per l'organizzazione e l'analisi di dati geografici per sviluppare processi interattivi, costruzione e utilizzo di banche-dati, sviluppo e plottaggio di cartografie tematiche in tempo reale. I dati possono essere orientati secondo una mappa se rappresentano caratteristiche qualitative di una zona (linee, punti, campiture, generalmente in formato vettoriale) o orientati all'immagine quando i dati sono quantitativi e riferiti alle celle di una maglia rettangolare (normalmente in formato raster). E' anche noto come sistema informativo geocodificato o georeferenziato.

**GNDI - CNR** = Gruppo Nazionale per la Difesa delle Catastrofi Idrogeologiche-Consiglio Nazionale delle Ricerche.

**GNHS** = Wisconsin Geological and Natural History Survey, Servizio Geologico e di Storia Naturale del Wisconsin.

**GOD** = Groundwater occurrence - Overall lithology of aquifer or aquitard - Depth to groundwater table or strike, un RS (vedi) per la valutazione della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento.

**HRS** = Hazard Ranking System, Sistema di Site Analysis codificato dall'USEPA per le procedure CERCLA.

**IAH** = International Association of Hydrogeologists, Associazione Internazionale degli Idrogeologi, accreditata presso tutti gli Organismi internazionali (ONU, UNESCO, FAO, ...)

**IC** = Indice di carsismo.

**IF** = Indice di fratturazione.

**IGM** = Istituto geografico militare italiano.

**IGME** = Instituto Geologico y Minero de España, Servizio Geologico e Minerario spagnolo.

**IRSA - CNR** = Istituto per la Ricerca sulle Acque.

**ISTAT** = Istituto Nazionale di Statistica.

**GGe SAN** = Istituto Superiore di Sanità, Roma.

**MS** = Matrix System, un sistema parametrico basato su matrice per la valutazione della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento.

**MVG** = Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap, Ministero della Comunità Fiamminga, Belgio.

**NRA** = National River Authority, agenzia inglese per il controllo e la gestione delle risorse idriche.

**NWWA** = National Water Well Association, Associazione Nazionale dei perforatori di pozzi, Stati Uniti.

**PC** = Personal Computer, Elaboratore personale.

**PCSM** = Point Count System Model, un sistema parametrico basato su punteggi e pesi di parametri selezionati per la valutazione della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento.

**PT** = Pumping Test, prova di pompaggio per determinare i parametri idrogeologici di un acquifero

**RDBMS** = Relational data Base Management System, software di gestione dei dati di tipo relazionale.

**ReS** = Remote Sensing, generico per tutti i tipi di telerilevamento, in particolare contraddistingue le tecniche di telerilevamento con sensori, multisensoriale, ecc. che indagano al di fuori dell'intervallo visibile dello spettro elettromagnetico (in genere contraddistinto dalla sigla RS, che in questo contesto ha un significato diverso).

**RI** = Rifiuti industriali.

**RIS** = Risorse idriche sotterranee.

**RISA** = Institute for Inland Water Management and Waste Water Treatment, Istituto per lo sfruttamento delle acque interne e per il trattamento delle acque di scarico, Paesi Bassi.

**RISE** = Risorse idriche Integrative, Sostitutive e di Emergenza, Progetto Speciale del GNDICI-CNR.

**RIVM** = Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieuhygiene, Istituto Nazionale per la Salute Pubblica e l'Igiene Ambientale dei Paesi Bassi.

**RS** = Rating System, un sistema parametrico basato su pesi di parametri opportunamente selezionati per valutare la vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento.

**RSU** = Rifiuti solidi urbani.

**RSp** = Rifiuti speciali.

**SDT** = Step Drawdown Test, prova di pozzo a gradini.

**SINA** = Sistema Informativo Nazionale per l'Ambiente in corso di attuazione presso il Ministero dell'Ambiente con la partecipazione degli Enti locali.

**SINTACS** = Soggiacenza (depth to ground water table), Infiltrazione (infiltration), azione del Non saturo (unsaturated zone action), Tipologia della copertura (soil cover), caratteri idrogeologici dell'Acquifero (aquifer hydrogeological features), Conducibilità idraulica (hydraulic conductivity), acclività della superficie Topografica (topographic surface average slope), un PCSM (vedi) completamente computerizzato per la valutazione della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento.

**SPOT** = Satellite Probatoire pour l'Observation de la Terre, satellite francese che porta due sistemi di scansione dell'immagine (HRV) con sistema di puntamento per ottenere immagini stereoscopiche.

**TDS** = Total dissolved solids, residuo fisso di un'acqua o soluzione acquosa.

**TOC** = Total Organic Carbon, parametro analitico basato sulla misura del biossido di carbonio derivante dalla ossidazione catalitica di sostanze organiche.

**TOT** = Time of Travel, anche Travel Time, tempo di transito di una sostanza idroveicolata attraverso l'insaturo.

**USDA** = United States Department of Agriculture

**USEPA** = United States Environment Protection Agency, l'Agenzia per la Protezione ambientale degli USA

**USGS** = United States Geological Survey, Servizio geologico degli USA.

**USSL** = Unità Socio Sanitaria Locale.

**VAZAR** = Vulnerabilità degli Acquiferi nelle Zone ad Alto Rischio, Progetto Speciale del GNDICI - CNR.

**WDNR** = Wisconsin Department of Natural Resources, Dipartimento dello Stato del Wisconsin per le Risorse Naturali.

**WPT** = Water Permeability Test, un tipo di prova di iniezione a pressione di acqua in un foro di sondaggio simile alla prova Lugeon.





## Appendice C: Data Base

Nel cd allegato sono riportati i dati relativi alla cartografia di vulnerabilità degli acquiferi. Tali dati sono consultabili attraverso due tipologie di interfacce: la prima è costituita da un database relazionale sviluppato in MS Access 97, la seconda è strutturata secondo un'architettura GIS, implementata con il software ESRI ArcView GIS 3.x.

Per la consultazione del database (vulnerabilità.mdb) è possibile utilizzare la maschera "dati" che consente un'immediata consultazione dell'elenco della cartografia disponibile nel cd e riporta dei metadati secondo una struttura che è riportata in tabella seguente. La figura mostra la maschera di consultazione.

**Struttura della tabella "dati" del DB "vulnerabilità.mdb"**

Nome	Tipo	Dimensione
Codice	Testo	6
Titolo	Testo	255
Scala_acquisizione	Testo	15
Scala_restituzione	Testo	20
kmq_coperti	Intero lungo	4
Metodo	Testo	50
Integrata	Sì/No	1
Stampata	Sì/No	1
In_stamp	Sì/No	1
Informatizzata	Sì/No	1
Software_utilizzati	Testo	50
Casa_editrice	Testo	50
Anno_pubblicazione	Intero	2
Anno_dato	Testo	10
Note_illustrative	Sì/No	1
Autori	Testo	150
Titolo_note	Testo	255
Pubblicate_su	Testo	150
N°pubbl_GNDCl	Intero	2
Committente	Testo	50
Unità_Operativa	Testo	50
Note	Memo	-

**Maschera "dati" del DB "vulnerabilità.mdb"**

Per la consultazione della parte GIS si consiglia di copiare il contenuto del cd in C:\ e di lanciare il progetto "vul\_italia.apr". Nel progetto sono inserite alcune "viste" (views) che riportano le singole carte (in formato raster). La vista "Cartografie della Vulnerabilità degli acquiferi" è una mappa di riepilogo rappresentante la distribuzione sul territorio

nazionale delle carte contenute nel cd (i dati sono vettoriali ed interrogabili). Le stesse carte raster sono salvate in formato "jpg" e sono facilmente consultabili dalla cartella "\\convampa\\Dati\\Raster".

